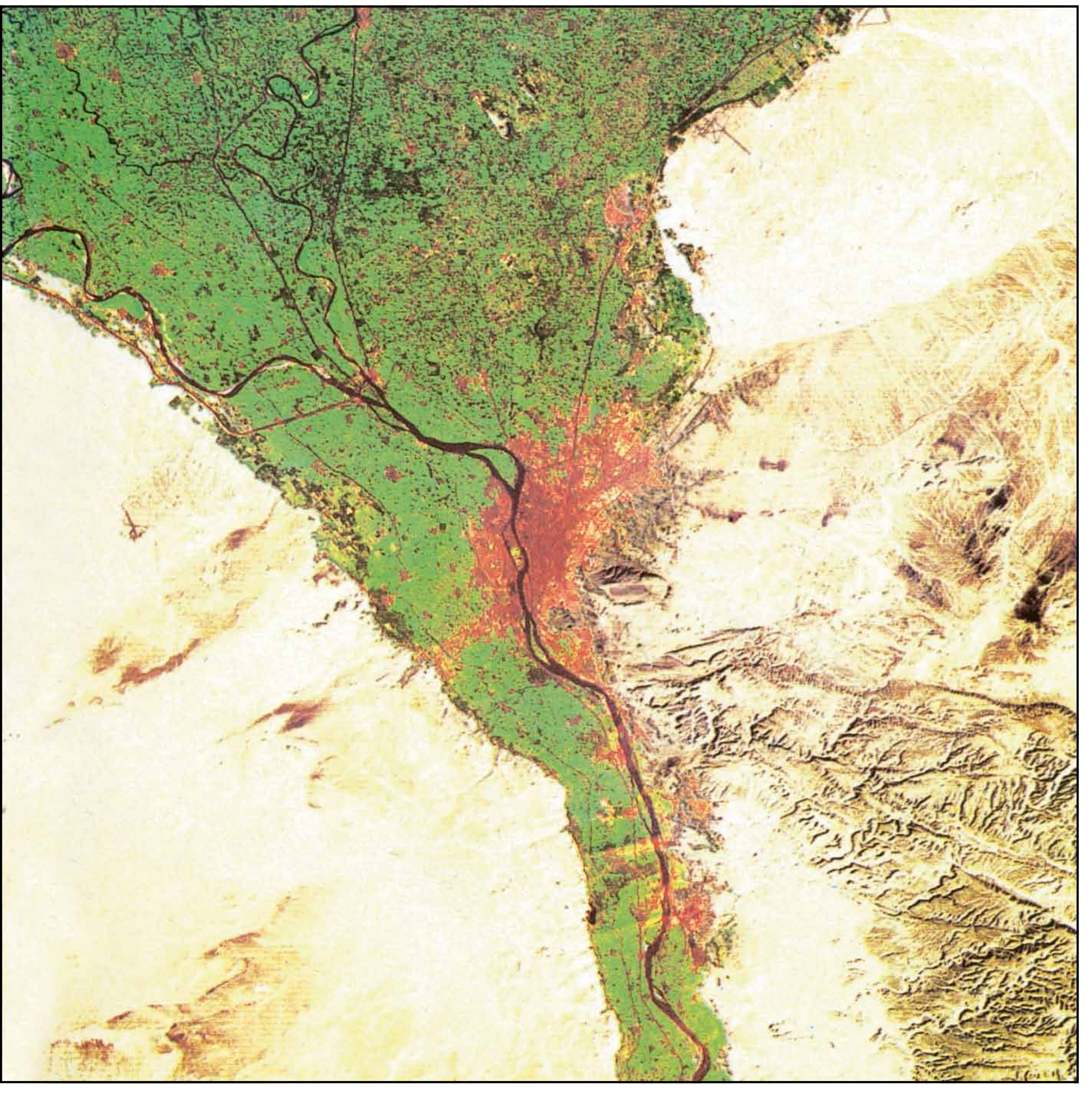
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



CONCENTRACIONES HUMANAS EN EL TERCER MUNDO

Junio 1985

400 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 105
Junio 1985

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Mireia Bofill: *Crecimiento de las regiones centrales del Tercer Mundo*; José Miguel Calvo Hernández y Juan Vilchez Bartolomé: *Los puntos calientes de la Tierra*; Emilio Fernández y Jacobo Cárdenas: *La liberación de acetilcolina*; Ramón Pascual: *Partículas y fuerzas elementales*; Ricardo Sánchez Tamés: *Compartimentalización de la podredumbre en los árboles*; José Luis Arroyo: *Anestesiología*; Donato Franco Carrera: *La turbina de vapor de Parsons*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

José A. Lozano, José Alcázar y A. de Robles

Libros:

Pedro Laín Entralgo, Jaume Truyols Santonja, F. J. de la Rubia y M. G. Velarde, Luis Alonso y Arturo Valls



LA PORTADA

En la ilustración de la portada puede verse el avance de El Cairo (*mancha rojiza*) sobre el delta del río Nilo. La imagen, obtenida a partir de los datos proporcionados por el satélite *Landsat 2*, se ha tratado para lograr unos colores similares a los que se percibirían a simple vista. El Cairo y sus alrededores forman el "centro" o "núcleo central" de Egipto, esto es, la región que alberga la mayor parte de la industria y la población urbana del país. La ciudad de El Cairo ha crecido vertiginosamente desde la segunda guerra mundial. Con sus más de 10 millones de habitantes es una de las zonas urbanas más densas del mundo. El grave hacinamiento y la contaminación ambiental parecen haber frenado su desarrollo, que en la actualidad es más lento que el del conjunto del país. El crecimiento incontrolado de las regiones centrales crea graves problemas en muchas naciones en vías de desarrollo. (Véase "Crecimiento de las regiones centrales del Tercer Mundo", de Daniel R. Vining, Jr., en este número.)

Suscripciones:

Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 4400 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
400 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
500 pesetas

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:

Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91

Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.° - 08034 Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de © Rand McNally & Co.

Página	Fuente
6	Editorial Labor, Barcelona
13	Hiroji Kubota, Magnum Photos, Inc. (*arriba*); AP/Wide World Photos (*abajo*)
14	Ilil Arbel
15	Richard W. Wilkie y John Montgomery
16	Ilil Arbel
17	Richard W. Wilkie y Thomas Gallagher
18-19	Ilil Arbel
22-23	Ian Worpole
24-25	Andrew Tomko
26	William F. Haxby, Lamont-Doherty
28	Ian Worpole
29	Andrew Tomko
33	L.-M. García-Segura, L. Orci e Y. Dunant
34-35	Bunji Tagawa
36	M. Israël, N. Morel, R. Manaranche y P. Mastour (*arriba*); M. Israël, J. Gautron y B. Lesbats (*abajo*)
37-38	Bunji Tagawa
39	D. Müller, L.-M. García-Segura, A. Parducz e Y. Dunant
40	Bunji Tagawa
42	J. A. Lozano y Ricardo Génova
47	James Kilkelly
48-52	Andrew Christie
53	Brian Wolfe Photography
54-57	Andrew Christie
58	Kenneth R. Dudzik
60-64	Patricia J. Wynne
65	Servicio Forestal de los Estados Unidos
69	"Paisajes Españoles" (*arriba*), R. Mar y J. Ruiz de Arbulo (*abajo*)
70-77	R. Mar y J. Ruiz de Arbulo
79	Cortesía de la Biblioteca de Medicina Francis A. Countway
80	Universidad de California
81-82	Ilil Arbel
84	Peter M. Winter
86-87	Museo de la Ciencia, Londres
88-89	Hank Iken, Walken Graphics, a partir de un esbozo de Alan Reid
90	Museo de la Ciencia, Londres (*arriba*); Hank Iken, Walken Graphics, tomado de Alan Reid (*abajo*)
91	Hank Iken, Walken Graphics, a partir de un esbozo de Alan Reid
92	Ann Ronan Picture Gallery
94-99	Jerome Kuhl
100-104	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

DANIEL R. VINING, JR. ("Crecimiento de las regiones centrales del Tercer Mundo") es profesor adjunto de ciencia regional de la Universidad de Pennsylvania, de cuyo centro de estudios de la población también forma parte. Estudió en las universidades de Yale y Princeton y se doctoró en 1974 por la Carnegie-Mellon. Ese mismo año fue contratado por la Universidad de Pennsylvania. Entre otros temas, Vining ha centrado su interés en la tasa de fertilidad, casi universalmente baja, de las poblaciones ricas, como las de Europa occidental, Norteamérica, Japón y Singapur, el flujo migratorio desde las regiones con un elevado crecimiento demográfico hacia las de bajo crecimiento demográfico y la escasez de recursos en el mundo.

GREGORY E. VINK, W. JASON MORGAN y PETER R. VOGT ("Los puntos calientes de la Tierra") son especialistas en geofísica marina; Vink disfruta de una beca del Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos para trabajar en el laboratorio de investigación que la Marina de los Estados Unidos tiene en Washington. Morgan es profesor de geofísica de la Universidad de Princeton y Vogt pertenece a la plantilla de geofísicos de ese laboratorio de investigación de la Marina. Vink se licenció por la Universidad de Colgate, en 1979, doctorándose por Princeton en 1983; su tesis doctoral describe la evolución tectónica del mar de Noruega-Groenlandia y del océano Artico. Morgan estudió en el Instituto de Tecnología de Georgia, doctorándose en física por Princeton, en 1964, donde sigue aún. Vogt se formó en el Instituto de Tecnología de California y en la Universidad de Wisconsin en Madison, por la que se doctoró en oceanografía en 1968. Trabaja para la oficina oceanográfica de la Marina de los Estados Unidos, dependiente del laboratorio de investigación de la Marina, hasta 1975; en la actualidad ocupa una plaza en la Universidad de Oslo. En 1975 fue codirector científico de la expedición de sondeo del fondo marino del Atlántico norte del *Glomar Challenger*.

YVES DUNANT y MAURICE ISRAËl ("La liberación de acetilcolina") son, respectivamednte, profesor de farmacología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Ginebra y director de investigación del Centro Nacional francés de Investigación Científica (CNRS) en Gif-sur-Yvette, Francia. Han colaborado ocasionalmente desde 1969, cuando se conocieron en un simposio sobre la liberación de acetilcolina. Dunant cursó sus primeros años de medicina en las Universidades de Lausanne, París y Ginebra; en 1961 obtuvo el diploma en medicina tropical por la Universidad de Basilea. Después de ejercer la medicina en Kinshasa, Zaire, volvió a Europa y comenzó a estudiar la transmisión del impulso nervioso a través de las sinapsis, tema en el que trabaja desde entonces. Israël se licenció en medicina y bioquímica por la Universidad de París en 1963, doctorándose por este centro en 1969 con un trabajo sobre vesículas colinérgicas en el órgano eléctrico del pez *Torpedo* y sobre la localización de las enzimas colinérgicas en las sinapsis neuromusculares.

CHRIS QUIGG ("Partículas y fuerzas elementales") es jefe del departamento de física teórica del Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi (Fermilab) de Batavia, Illinois; también enseña física en la Universidad de Chicago. Tras cursar estudios en Yale, se recibió de doctor por la Universidad de California en Berkeley en 1970. Hasta 1974 trabajó en el Instituto de Física Teórica de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, primero en calidad de investigador asociado y, después, como miembro del claustro docente. Aquel año se trasladó al Fermilab, donde, en 1977, accedió a su cargo actual. Durante su estancia en la École Normale Supérieure de París, de 1981 a 1982, como profesor visitante, Quigg escribió un libro de texto sobre teorías de aforo.

ALEX L. SHIGO ("Compartimentalización de la podredumbre en árboles") es jefe de investigación de la Estación Forestal Experimental del Nordeste, del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en Durham, New Hampshire. Licenciado en biología por el Waynesburg College de Pennsylvania, se doctoró en patología vegetal por la Universidad de Virginia Occidental, en 1959. Desde ese año ha trabajado para el Servicio Forestal norteamericano. El principal tema de investigación de Shigo ha sido la podredumbre en los árboles y los problemas relacionados con ella: cómo ocurre, cómo detectarla, cómo prevenirla y cómo obtener árboles que la resistan.

PETER M. WINTER y JOHN N. MILLER ("Anestesiología") se dedican a la práctica universitaria de la medicina en la especialidad de anestesiología. Dirige el primero el departamento de esa disciplina en la Facultad de Medicina de la Universidad de Pittsburgh, en tanto que el segundo desempeña ese mismo cargo en la de Alabama del Sur. Winter curso el primer ciclo de estudios universitarios en Cornell, licenciándose en medicina por la Facultad de Medicina y Odontología de Rochester, en 1958. Se especializó en anestesiología en el Hospital General de Massachusetts. Tras un trienio de investigación en fisiología en la Universidad de Nueva York en Buffalo, Winter se incorporó a la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington, donde permaneció 10 años, accediendo luego a su cargo actual. Miller se licenció en medicina por la Universidad de Sidney en 1963; realizó la residencia en anestesiología en la Universidad de Washington. Culminado el período de prácticas, enseñó en la Universidad de Duke, trasladándose luego a la Universidad de Alabama del Sur. Centra su interés en la fisiología del buceo.

W. GARRETT SCAIFE ("La turbina de vapor de Parsons") es profesor adjunto de ingeniería del Trinity College de la Universidad de Dublín. Tras obtener la licenciatura en ingeniería por la Universidad de Londres, en 1951, se dedicó durante seis años al diseño y gestión de estaciones de potencia del Irish Electricity Supply Board. Trabajó luego como ingeniero de diseño para un fabricante de equipamiento eléctrico. En 1962 volvió a la enseñanza, en la escuela de ingeniería del Trinity College, donde comenzó dictando termodinámica. En 1967 se doctoró por la Universidad de Dublín con una tesis sobre la conducta de dieléctricos líquidos sometidos a alta presión, tema cuya investigación prosigue. Desde 1977, Scaife ocupa su cargo actual.

RICARDO MAR y JOAQUIN RUIZ DE ARBULO ("El templo del foro romano de Ampurias"), arquitecto aquél y arqueólogo éste, se han especializado en arqueología clásica. Han trabajado en las excavaciones de Ampurias (en la provincia de Gerona) desde 1979 y en el teatro romano de Tarragona desde 1981. Han publicado diversos artículos sobre metodología arqueológica, arquitectura y urbanismo de época romana.

Hace...

José M.ª López Piñero

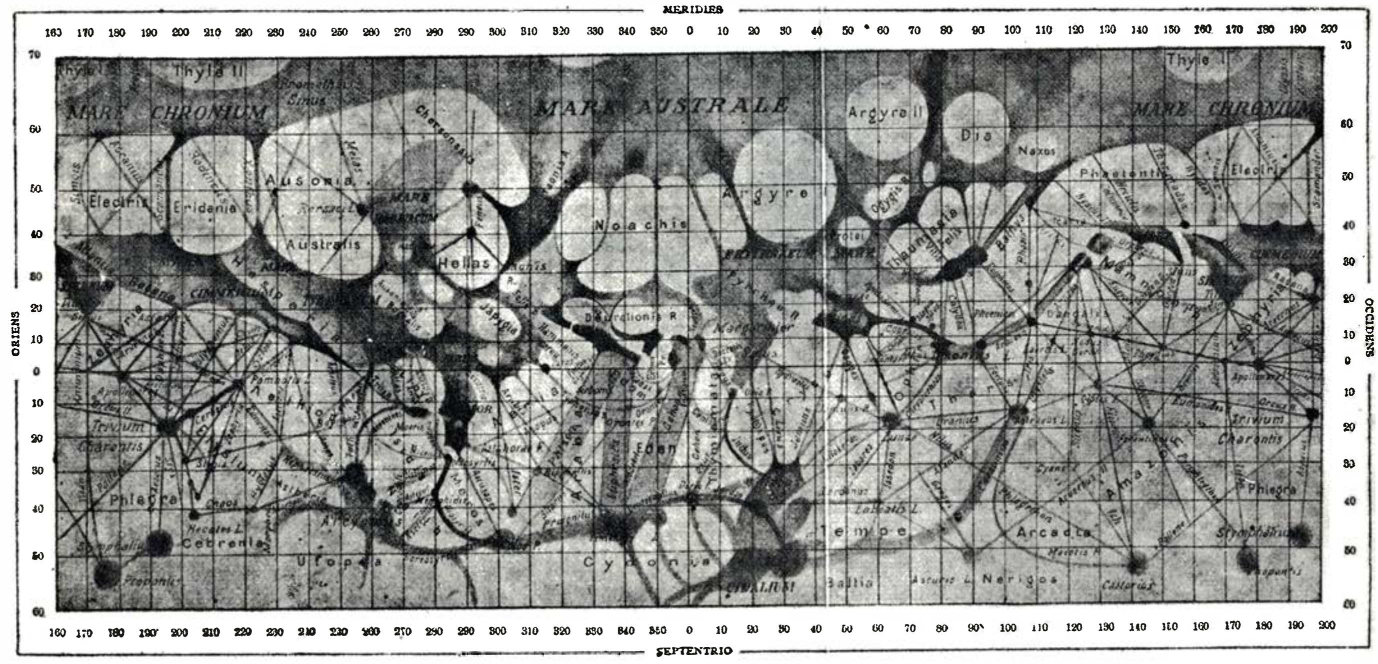
... cien años

Josep Comas i Solà inició su observación sistemática de los eclipses de Luna y de Sol, tarea en la que trabajó a lo largo de más de tres décadas.

Nacido en Barcelona el año 1868, Comas realizó todos sus estudios en esta ciudad y obtuvo la licenciatura en ciencias físico-matemáticas en 1889. Antes de terminar la carrera comenzó, como hemos adelantado, su dedicación a la observación astronómica. Dispuso de mayores medios a partir de 1896, fecha desde la cual trabajó en el observatorio privado que había instalado en Barcelona Rafael Patxot i Jubert, que tenía, entre otros instrumentos, un refractor ecuatorial doble. En 1901 ingresó en la Academia de Ciencias, de Barcelona, y fue encargado de dirigir la instalación del Observatorio Fabra, que hizo realidad un proyecto presentado a dicha institución por Eduard Fontserè Riba. El propio Fontserè se encargó más tarde de la sección meteorológica y sismológica del Observatorio, mientras que Comas encabezó la sección astronómica desde 1904 hasta su fallecimiento, el año 1937.

Comas justificó su larga dedicación al estudio de los eclipses en los siguientes términos: "Las observaciones físicas que pueden llevarse a cabo durante los momentos en que tiene lugar un eclipse de Luna o de Sol son importantes. Por lo que se refiere a los eclipses de Luna, es de notar que, en general, nuestro satélite subsiste perfectamente visible en plena totalidad, llamando muchísimo la atención el que su coloración sea rojiza en las partes centrales. La explicación de este fenómeno no es difícil. En efecto, se debe, como ya hemos dicho, a la refracción que sufren los rayos solares en la atmósfera terrestre. Estos rayos refractados se cruzan antes de llegar a la Luna, y por consiguiente, la iluminan débilmente, y se comprende muy bien que domine en esa iluminación el color rojizo por cuanto la atmósfera terrestre presenta este color por transparencia cuando el espesor es muy considerable, conforme observamos en la coloración del Sol cuando rasa el horizonte o en la coloración de los arreboles. Si en el momento del eclipse de Luna la atmósfera terrestre está muy cargada de nubes, la iluminación de nuestro satélite es muy escasa, llegando casi a desaparecer; lo contrario ocurre cuando la atmósfera está muy despejada. Inútil es decir que un observador situado en la Luna vería la Tierra... rodeada de un aro luciente y rojizo.

"Por lo que se refiere a los eclipses de Sol, ya hablamos de su importancia al tratar de las protuberancias y de la corona del astro central, y ahora podemos añadir que gracias a esas observaciones, que requieren a veces costosísimos viajes, ha sido posible descubrir que existe una relación indudable entre las formas de la corona y el período undecenal de la actividad solar. En España se han podido observar recientemente en muy buenas condiciones tres eclipses de Sol muy notables: los de 1900, 1905 y 1912." El de 1900 lo siguió Comas desde Elche; el de 1905, desde Vinaroz; y en el de 1912, que observó desde Galicia, realizó un registro cinematográfico del curso del fenómeno.



1. Dibujo de Comas para explicar, en una obra de divulgación, la sombra que la Luna proyecta sobre la Tierra en un eclipse de Sol: "Cuando ocurre un eclipse de Sol no deja por eso de girar la Tierra alrededor de su eje, de manera que la sombra que proyecta la Luna recorrerá cierto camino sobre la superficie de la Tierra mientras dure el eclipse. Este camino lo determinan previamente los astrónomos, y para indicarlo lo dibujan sobre un mapa terrestre. La línea OCA pasa por todos los lugares del globo en que el primer contacto coincide con la salida del Sol, y la ABO recorre los lugares en que la salida del Sol coincide con el último contacto, es decir, con el final del eclipse. La A'C'O pasa por los puntos en que el principio del eclipse coincide con la puesta del Sol, y la A'B'O por los puntos en que el último contacto ocurre al ponerse el Sol. Las líneas OA y OA' recorren los lugares a que llega en su punto medio".



2. Planisferio de Marte que figura en la **Astronomía** *(1932), de Comas.*

El aspecto de la obra astronómica de Comas que tuvo mayor repercusión internacional fue el relativo a las observaciones de planetas. Destacan en especial las que dedicó a Marte, que le permitieron confeccionar el primer mapa español de su relieve (1894) y convertirse en una autoridad de gran prestigio sobre el tema. Entre otras muchas aportaciones de detalle fue, por ejemplo, el primer especialista que demostró que los famosos "canales" eran fenómenos aparentes: "Señalaremos un hecho que ha pasado ya a la historia de los errores humanos. Este es la hipótesis de la existencia de *canales* en Marte. Forman los canales una complicada red de líneas oscuras que cruzan en todas direcciones la superficie marciana y fueron descubiertos, la mayoría, por Schiaparelli en 1877. Desde luego, causó gran asombro y revuelo entre los astrónomos y muchos que se dedicaron a su estudio con verdadera fruición, fundándose las más peregrinas hipótesis sobre su existencia. ¿En qué consistían esos canales? ¿Eran obra ciega de la Naturaleza o bien el trabajo de una civilización incomprensible? Ya el mismo Schiaparelli indicó la posibilidad de que fueran debidos a un efecto natural relacionado con las estaciones. Realmente, es hacer muy poco favor a los habitantes de Marte suponerles dotados de una inteligencia tan miope que necesiten hacer canales, algunos de los cuales miden centenares de kilómetros de anchura, para los simples efectos de navegación y riego. Sin embargo, hacía dudar la regularidad del trazado, que parece opuesto a la variedad constante y a la tónica compleja que la Naturaleza nos muestra en todas sus obras. Cuando Schiaparelli dio a conocer su descubrimiento, algunos astrónomos, entre los cuales figuró Green, expusieron sus dudas, mientras otros negaron rotundamente la objetividad de las imágenes que dibujó Schiaparelli; pero tras encarnizada polémica, el triunfo, aunque no la razón, se inclinó por la parte de los *canalistas*, y el error llegó a su máximo en 1888.

"En 1901 el autor de estas líneas fue el primero que, en un trabajo publicado en el *Bulletin de la Société Astronomique de France*, dio razones irrebatibles probando que, cuando menos la mayor parte de los canales observados en los últimos años, no existían más que en la mente de los observadores, y que estas supuestas líneas geométricas no eran más que alineaciones de detalles topográficos mal vistos."

Comas estudió también el planeta Júpiter, en el que descubrió la llamada "zona gris". "En 1901 observó el autor en el hemisferio austral una serie de manchas dispuestas como las cuentas de un rosario a una latitud sensiblemente igual a la del centro de la mancha roja. Estas manchas tangentes a la zona ecuatorial austral avanzaban con una velocidad de rotación de 9 horas, 55 minutos y 14 segundos, mientras la mancha emplea en recorrer la misma trayectoria 9 horas, 55 minutos y 42 segundos. Existía, pues, una diferencia de 28 segundos, de manera que el rosario de manchas debía alcanzar a la mancha roja, hasta ponerse en contacto con ella, en el mes de junio de 1902. Así ocurrió, en efecto; pero las machas, en vez de ser repelidas por la mancha roja, desaparecieron; mas de pronto se las vio aparecer por el lado opuesto. El hecho de pasar este rosario de manchas por *debajo* de la mancha roja hace suponer que ésta flota, en efecto, en la atmósfera y que está constituida por una placa o nube rígida de naturaleza desconocida. Como se ve, la hipótesis continental cae precisamente por falta de base. Sería absurdo suponer un continente flotando en la atmósfera. Sin embargo, la dificultad de explicación de lo que es esa mancha aumenta más, si cabe, todavía; pero por ello no hay que descorazonarse, porque aunque nos la expliquemos menos, es lo cierto que cada vez la conocemos más. Los antiguos se explicaban el Universo *perfectamente*, a su antojo; los modernos no se lo explican todo tan *perfectamente*, pero al menos nos cabe la satisfacción íntima de creer que no suceden las cosas a nuestro antojo, sino de acuerdo con una realidad maravillosa.

"Gracias a posteriores observaciones descubrí que el rosario de manchitas que pasa por debajo de la mancha roja, o sea, lo que llamo "zona gris", retarda su movimiento y la mancha roja lo acelera como si la zona gris cediera fuerza viva a la mancha roja." Por otra parte, hizo algunas precisiones acerca de los satélites de Júpiter I (Io), II (Europa) y III (Ganímedes): "Valiéndome del ecuatorial doble del Observatorio de Fabra, he podido hacer interesantes observaciones de los satélites I y II, cuyas conclusiones son que, efectivamente, el satélite I tiene forma alargada, aunque no es precisamente oval, como suponía Holden, sino que es una superficie de revolución muy aplastada. Es de advertir que este anómalo aplastamiento podría ser sólo aparente como efecto de existir en su disco manchas oscuras. En cuanto al satélite III, he

Núm.	Nombre	Duración de la revolución sideral	Época del paso por el perihelio	Distancia perihélica	Distancia afélica	ε Excentricidad	π Longitud del perihelio	Ω Longitud del nodo ascendente	i Inclinación	Equinoccio
		Años	d h m				0 ′ ″	0 ′ ″	0 ′ ″	
1	**Encke**..........	3,299	1911. **Agosto** .. 19 12 58	0,33833	4,09349	0,847272	159 9 1	334 29 32	12 34 32	1911,0
2	**Tempel**.........	5,173	1910. **Febrero**. . 8 14 55	1,32260	4,65970	0,572829	307 16 42	110 37 59	12 45 17	1910,0
3	**Brorsen**.........	5,456	1890. **Febrero**. . 24 14 31	0,58776	5.61038	0,810343	116 23 10	101 27 34	29 23 48	1890,0
4	**Tempel-L. Swift**...	5,681	1908. **Octubre**. . 1 9 11	1,15316	5,21424	0,637793	43 59 57	290 18 40	5 26 33	1910,0
5	**Winnecke**.	5,892	1909. **Octubre**. . 9 12 43	0,97252	5,55219	0,701897	271 36 54	29 21 20	18 16 58	1909,0
6	**De Vico.-E. Swift.**	6,400	1901. **Febrero**. . 14 4 16	1,66960	5,22477	0,515662	348 56 56	24 50 39	3 35 17	1900,0
7.	**Perrine**	6,454	1909. **Novbre**. . 1 8 0	1,17273	5,76040	0.661702	49 9 17	242 17 39	5 14 32	1909,0
8	**Giacobini-Zinner**..	6,510	1913. **Novbre** . . 2 13 44	0,9759	5,9974	0,72010	7 22 4	195 52 24	30 43 36	1913,0
9	**Tempel**..........	6,538	1898. **Octubre**. . 4 11 32	2,09114	4,90196	0,401942	241 16 4	72 36 5	10 47 14	1898,0
10	**Finlay**...........	6,540	1906. **Septbre**. . 8 20 33	0,96538	6,02881	0,723947	8 10 55	52 22 38	3 3 6	1906,0
11	**D'Arrest**.........	6,542	1910. **Septbre**. . 6 13 15	1,26997	5,72547	0,636915	320 9 40	146 22 19	15 47 28	1910,0
12	**Biela (núcleo 1)**. .	6,692	1866. **Enero**. . . 26 2 10	0,87915	6,22289	0,752423	109 40 18	245 46 11	12 21 58	**de l'ép.**
	Biela (núcleo 2). .	6,693	1866. **Enero**. . . 27 23 13	0,87918	6,22404	0,752456	109 40 12	245 45 13	12 22 13	**de l'ép.**
13	**Wolf**............	6,804	1912. **Febrero**. . 24 5 27	1,58755	5,59367	0,557860	19 27 2	206 36 56	25 16 0	1910,0
14	**Holmes**.........	6,857	1906. **Marzo**. . . 14 16 1	2,12172	5,00604	0,412157	346 2 32	331 45 41	20 48 53	1906,0
15	**Borrelly**.........	6,930	1911. **Dicbre** . . 18 12 ●	1,40263	5,86678	0,614101	69 12 19	76 50 28	30 26 28	1911,0
16	**Brooks**..........	7,101	1911. **Enero**. . . 8 20 32	1,96301	5,42888	0,468875	1 44 1	18 13 10	6 3 34	1910,0
17	**Faye**............	7,438	1910. **Novbre**. . . 1 23 14	1,66552	5,96559	0,565605	45 31 29	206 14 14	10 35 37	1910,0
18	**Tuttle**...........	13,667	1899. **Mayo** . . . 5 0 30	1,01913	10,41330	0,821712	116 29 3	269 49 54	54 29 16	1900,0
19	**Westphal**	61,12	1913. **Novbre** . . 26 14 34	1,2624	29,7706	0,91664	43 19 21	346 47 45	42 33 7	1913,0
20	**Pons-Brooks**.....	71,56	1884. **Enero** . . . 26 5 22	0,77573	33,69805	0,954996	93 17 15	254 5 42	74 2 36	1880,0
21	**Olbers**..........	72,65	1887. **Octubre**. . 8 23 39	1,19912	33,62339	0,931130	149 52 31	84 32 20	44 34 16	1890,0
22	**Halley**..........	76,02	1910. **Abril**. . . . 20 2 48	0,58715	35,30339	0,967281	168 58 28	57 16 12	162 12 42	1910,0

3. Tabla de Comas acerca de "los cometas cuya vuelta ha sido observada".

visto en él detalles topográficos, quizá nubes, y brillantes regiones polares que le dan un aspecto parecido al de Marte. Su rotación debe ser muy lenta, probablemente igual al período de su revolución, como le sucede a la Luna". Aprovechando la mancha blanca tropical de Saturno, que acababa de descubrir Barnard, determinó el período de rotación de este planeta: "Hace unos años, Barnard, del Observatorio de Yerkes, descubrió una brillante mancha tropical. Tuve yo la fortuna de ser el primero en poder dar cuenta del valor de su rotación, luego confirmado por los trabajos del mismo Barnard y otros astrónomos, rotación que resultó ser de 9 horas, 38 minutos y 6 décimas. La diferencia entre el resultado que encontré y el de Hall es, en realidad, enorme, pues significa que la corriente ecuatorial se mueve respecto de la tropical con la velocidad de casi 400 metros por segundo, es decir, más que la velocidad de propagación del sonido en las capas bajas de nuestra atmósfera".

A este mismo capítulo de su obra astronómica corresponde su aportación al descubrimiento de asteroides. Como es sabido, los cuatro primeros –Ceres, Palas, Juno y Vesta– fueron descritos entre 1801 y 1807, iniciándose cuarenta años después, con las observaciones de Hencke, la serie de observaciones sistemáticas que vienen enriqueciendo desde entonces, de forma casi ininterrumpida, los catálogos con nuevos astros de este tipo. La contribución española la inició Comas con el descubrimiento del que bautizó con el nombre de *Hispania*, que quedó catalogado con el número 804. Más tarde dio a conocer otros diez, entre los que destaca el *Barcelona* (945) por la gran inclinación de su órbita.

Los cometas fueron asimismo objeto de la fértil actividad descriptiva de Comas. Descubrió dos que están asociados a su nombre: "Entre los últimos cometas descubiertos de corto período debe citarse el de Comas Solá (1926-f), descubierto por el autor de estas líneas. Pasó por el perihelio el 22 de marzo de 1927, siendo su excentricidad igual a 0,575; su inclinación, 13° 46′ y el período de su revolución alrededor del Sol, 8.528 años. Es telescópico y pertenece también a la familia de Júpiter, como la mayoría de los de período corto. En cambio, el cometa Schain-Comas Solá (1925-a) pasó por el perihelio el 27 de agosto de 1925, con la excepcional distancia perihelia 4.209, para no volver nunca más, pues su órbita es ligeramente hiperbólica".

No vamos a ocuparnos en esta ocasión de otros aspectos notables de su producción científica, como los relativos a la física teórica y a la sismología. En este año, en el que va a volver a aparecer el cometa de Halley, parece obligado terminar con algunos párrafos de su reseña del paso de 1910: "La aparición del cometa de Halley soliviantó los ánimos en 1910 con la predicción de que la Tierra atravesaría su cola, lo que ocasionó no poca pasión hasta en naciones muy civilizadas. España quedó con este acontecimiento a gran altura, pues dio una prueba notable de su buen criterio al tener confianza en la Astronomía, lo cual es un aspecto consolador en medio de otros mil que asuelan nuestra patria querida. Sin embargo, en aquella ocasión no dejé de repetir hasta la saciedad que podía asegurarse que ningún peligro corríamos por la inmersión de la Tierra dentro de la cola del cometa de Halley. La razón más importante que condujo a esta conclusión fue que la cantidad de gases cometarios que podría chocar con la atmósfera terrestre, aun tomando datos superiores a la realidad, hubiera sido tan exigua que, admitiendo su importancia como tóxico, no llegaría a producir el efecto que producen en una ciudad medianamente importante los escapes de gas del alumbrado y los gases que se desprenden de los imbornales y que de continuo respiramos...".

"He aquí los principales resultados

obtenidos por el autor durante el primer período, o sea hasta el 17 de abril, fecha de la conjunción inferior, en que las observaciones adquieren mayor importancia por esa circunstancia y por el paso posible de la Tierra por la cola del cometa.

"La longitud visible de ésta en las inmediaciones del perihelio fue de 50 millones de kilómetros. Como carácter constante es digna de mención la forma casi rectilínea de la cola, aspecto que debe atribuirse, sin duda, a la circunstancia de que la Tierra estaba muy próxima al plano de la curvatura. La cola apareció generalmente bifurcada. Fotográficamente, estaba constituida por largos y numerosos filamentos, sin que se vieran bocanadas ni grandes desviaciones en el arranque de los filetes. Esto debió ser resultado de la mayor intensidad de la fuerza repulsiva solar, ya que en aquella época (últimos de abril y primeros de mayo) el cometa estuvo poco distante del perihelio. Como de costumbre, se supone que la bifurcación de la cola es un efecto de su forma geométrica que, aunque toscamente, puede compararse con una superficie cónica cuyas generatrices fuesen los filetes; por tal motivo, éstos deben aparecer más juntos cuanto más nos acerquemos a los bordes de la cola. El diámetro de la cabeza fue, a partir del 4 de mayo, de unos 110.000 kilómetros, y el del núcleo podía estimarse en 3500 kilómetros. Presentó este cometa un espectro continuo, un espectro solar y rayas de emisión del cianógeno, del sodio, y en el núcleo las bandas características de los hidrocarburos...

"Después de la conjunción se observó que la disminución de la fuerza repulsiva coincidió con las apariciones centrales de nubes o masas caudales y desviaciones de la trayectoria de los filetes que pudieran hacer suponer la existencia en el espacio de un medio muy débilmente resistente.

"El 2 de junio vi desdoblarse el núcleo del cometa; pero el día 4 esta apariencia revistió caracteres notabilísimos. Alrededor del núcleo propiamente dicho apareció un grupo de núcleos secundarios, pálidos y más o menos luminosos. Para no prejuzgar la naturaleza de estos núcleos secundarios o emanaciones fosforescentes, los llamé simplemente *globos*. Es de notar que Rheden, de Viena, confirmó las mismas emanaciones globulares observadas por mí. Estos globos se desprendían del núcleo con velocidades aceleradas y en sentido opuesto al Sol, nutriendo como otras tantas bocanadas gaseosas la materia caudal del cometa."

Crecimiento de las regiones centrales del Tercer Mundo

En ellas se sitúa la industria y la mayoría de las principales ciudades. Desde 1950, la población de las regiones centrales de las naciones en desarrollo ha aumentado a un ritmo que plantea graves problemas sociales y económicos

Daniel R. Vining, Jr.

¿Cuál es el problema demográfico más apremiante del Tercer Mundo? La respuesta habitual suele remitir al rápido crecimiento demográfico. Pero muchas naciones en vías de desarrollo tienen un problema demográfico con implicaciones inmediatas muchísimo más graves: la creciente concentración de la población en sus principales ciudades. Un ejemplo impresionante es el de Corea del Sur. En 1955, su población era de 21,5 millones y un 18 por ciento de la misma residía en Seúl o sus alrededores. Durante los 25 años siguientes, más de la mitad del crecimiento demográfico del país tuvo lugar en la región de la capital. En 1980, la población total alcanzaba los 37,4 millones y un 36 por ciento de todos los coreanos residía en Seúl o aledaños. Más de la mitad de la producción económica total del país se concentraba en un radio de 25 kilómetros del centro de la capital.

En términos de geografía económica, Seúl y sus alrededores constituyen el "centro" o "núcleo central" de Corea del Sur. El resto del país forma la "periferia". El centro, que puede abarcar una parte considerable del territorio nacional, es el punto neurálgico de la nación. Además de concentrar gran parte de la industria y de la población urbana del país, el centro suele ser el foco de la red de transportes y la sede del gobierno nacional. Dada su importancia, cualquier perturbación que se produzca en él puede amenazar la estabilidad de toda la nación. El rápido crecimiento demográfico de las regiones centrales está creando precisamente este efecto perturbador en todo el Tercer Mundo. En algunas grandes ciudades de las naciones en vías de desarrollo, la superpoblación y la contaminación parecen estar rebasando el límite de las posibilidades ecológicas del medio. Asimismo, el rápido crecimiento demográfico del núcleo central crea una demanda de viviendas, transportes y asistencia sanitaria que grava onerosamente el presupuesto de los países pobres. Las desproporcionadas inversiones públicas que se requieren para cubrir estas necesidades y evitar el caos en el centro pueden provocar considerable malestar entre los habitantes de la periferia.

Los técnicos políticos de varios países en vías de desarrollo temen que el crecimiento desproporcionado del núcleo central pueda llevar a sus naciones al desastre político o ecológico. Pero no es fácil elaborar políticas capaces de contener eficazmente el crecimiento del núcleo central en un país no comunista. La razón estriba en que la expansión del centro es en gran parte un subproducto del crecimiento económico, en sí mismo deseable. Por la dinámica del desarrollo económico, resulta más rentable invertir en el centro que en la periferia. En consecuencia, tanto la inversión pública como la privada tienden a concentrarse en la región central. El nivel de vida relativamente elevado de la misma atrae a un número creciente de personas del campo. En los países comunistas, donde el gobierno ejerce un grado considerable de control sobre los movimientos de las personas, es posible frenar la tasa de crecimiento demográfico del centro. Por el contrario, en la mayoría de países no comunistas la afluencia de población hacia el centro sólo disminuye cuando la producción económica alcanza un nivel bastante elevado, que permite dispersar la inversión pública por todo el territorio nacional. Sin embargo, observaciones recientes indican que medidas de política encaminadas a mejorar las condiciones de vida en las regiones periféricas pueden frenar el movimiento migratorio hacia el centro, incluso a un nivel bastante bajo de desarrollo económico.

Las citadas tendencias han podido observarse en un reciente estudio sobre 46 países del Tercer Mundo, destinado a averiguar si en la década de 1970 disminuyó el flujo de población hacia los núcleos centrales, bastante acelerado en las décadas de 1950 y 1960. Los países objeto del estudio se seleccionaron en razón de dos criterios. En primer lugar, debían haber efectuado un censo nacional de población en 1980 o no más de dos años antes o después. En segundo lugar, debían poseer datos censales para la totalidad o la mayor parte del período comprendido desde 1950 hasta esa fecha. En el conjunto de países estudiados se hallan representadas todas las principales regiones del Tercer Mundo. Las únicas omisiones significativas corresponden a Africa, donde muchas naciones no efectúan censos regulares de su población.

Los geógrafos emplean el concepto de centro o núcleo central para explicar las tendencias económicas y demográficas de todo un territorio nacional. Los censos se efectúan por zonas administrativas, como las provincias y los estados, más que en virtud de la distinción entre centro y periferia. De ahí que para analizar los datos censales sea preciso construir una aproximación de la región central a través de la agrupación de varias zonas administrativas. En nuestro trabajo creamos una aproximación algo más extensa que la auténtica región central de cada país. En la medida en que algunas personas pueden trasladarse al centro propiamente dicho desde las zonas periféricas de la región aproximada objeto del estudio, es posible que este método dé lugar a una ligera subestimación de la migración hacia el núcleo central. Sin embargo, propor-



1. P'YŎNGYANG, capital de Corea del Norte, ha visto sometido su crecimiento a un severo control del gobierno comunista del país. En la fotografía puede verse la calle Chollima, una de las principales vías de la ciudad. Las calles de P'Yongyang están relativamente vacías puesto que en Corea del Norte son escasos los automóviles privados. Los bloques de pisos del fondo y el parque del primer plano son elementos característicos de la ciudad contemporánea. P'Yŏngyang, gravemente dañada por los bombardeos norteamericanos durante el conflicto coreano, se ha reconstruido de forma planificada y ha visto limitado rigurosamente su crecimiento. Estimaciones de 1980 cifraban la población del área metropolitana en torno a 1,7 millones de habitantes.



2. SEUL, capital de Corea del Sur, ha experimentado un crecimiento incontrolado a partir de la Segunda Guerra Mundial, como sugiere esta fotografía de un concurrido barrio comercial de la misma. Según las estimaciones, la población actual del área metropolitana de Seúl se cifra en torno a los 13,7 millones de habitantes. Las principales calles de Seúl se llenan tanto a las horas punta que en 1969 fue preciso suprimir el servicio de tranvías. Todavía no está terminada la red de metro que debe sustituirlos. Seúl sufre escasez de viviendas, de agua, de electricidad y de alcantarillas. En general, los gobiernos no comunistas de las naciones del Tercer Mundo han encontrado bastantes dificultades para controlar el crecimiento de sus principales ciudades.

ciona un cuadro aceptablemente fidedigno de las tendencias demográficas dentro de este núcleo.

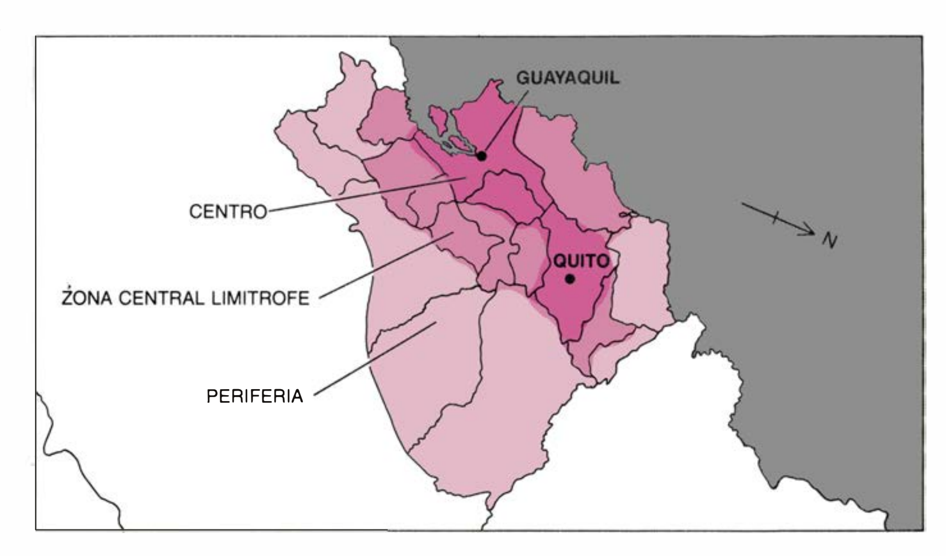
En una nación del Tercer Mundo con una región central dominante bien definida, la tasa de crecimiento demográfico del centro suele superar la media nacional en un 10 o un 20 por 1000 anual. Por ejemplo, la tasa media de crecimiento de un país del Tercer Mundo puede significar que por cada mil habitantes existentes a principios de año, a finales del mismo habrá 1030. En el núcleo central el incremento sería de 1000 a 1045, por ejemplo. Este incremento relativo no es resultado de una tasa natural de crecimiento superior en el centro que en la periferia. La mayoría de países en vías de desarrollo presentan una alta tasa de crecimiento demográfico tanto en el centro como en la periferia, aproximadamente idéntica en ambas zonas. El crecimiento relativo del centro, más que a su propio incremento, se debe a la inmigración desde las regiones alejadas a las grandes ciudades. Esta migración puede provocar grandes cambios en la concentración demográfica en poco tiempo.

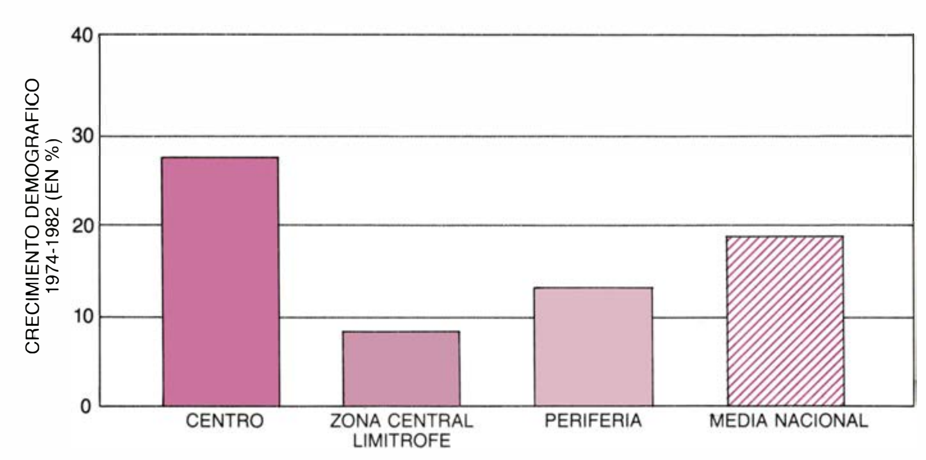
Los resultados del presente estudio sugieren que los dos factores que mejor parecen explicar las tendencias de concentración demográfica de las naciones en vías de desarrollo son el nivel de desarrollo económico y el hecho de que la estructura política del país sea o no comunista. Como veremos, también intervienen otros factores, pero los dos citados explican buena parte de las diferencias observadas entre los países de la muestra. El segmento más importante de las 46 naciones está integrado por naciones no comunistas con un desarrollo económico bastante avanzado y un flujo estable o creciente de migración hacia el núcleo central.

En América Latina, las regiones de Ciudad de México, São Paulo, Santo Domingo, Ciudad de Panamá y Quito y Guayaquil, con sus correspondientes zonas metropolitanas, presentaron todas tasas estables o crecientes de crecimiento demográfico en relación a la media nacional durante la década de 1970. En el Asia meridional, Nueva Delhi, Bombay, Calcuta, Karachi y Dacca, con sus regiones metropolitanas, presentaron en los años 1970-1979 tasas netas de migración superiores a las de las dos décadas precedentes. Las principales ciudades del este y el sudeste asiático (excepto las de los países comunistas), incluidas Seúl, Taipei, Manila, Yakarta, Bangkok y Kuala Lumpur, también presentaron tasas netas de migración estables o crecientes, en comparación con las cifras del período de postguerra, durante ese mismo intervalo.

La mayor parte de las regiones centrales de Africa septentrional y Oriente Medio muestran también tasas crecientes de desarrollo demográfico relativo. En particular, las regiones de Argel, Túnez, Teherán y los dos centros urbanos de Trípoli y Bengazi, en Libia, con sus correspondientes zonas circundantes, están experimentando un rápido crecimiento en relación al resto del país. En Turquía, en cambio, a finales de la década de 1970 se produjo una reducción en la tasa de migración hacia las grandes ciudades de Ankara e Istambul. Un descenso debido, quizás, a las perturbaciones políticas y sociales que aquejaron a esas ciudades en la segunda mitad de la pasada década y que seguramente resultará transitorio.

La precariedad de los datos censales para buena parte del Africa subsahariana dificulta el análisis de las relaciones demográficas entre el centro y la periferia. Sin embargo, es evidente que los países situados al sur del Sahara presentan un núcleo central más reducido (en relación a la población nacional y en términos absolutos) que los de las restantes naciones del Tercer Mundo. Las principales excepciones son Lagos, en Nigeria, y Kinshasa, en Zaire (para las cuales existen escasos datos censales) y las zonas metropolitanas de Sudáfrica, en las que se está incrementando rápidamente la proporción de residentes de los cuatro grupos raciales representados en aquel país. Dadas las reducidas dimensiones de las regiones centrales del Africa subsahariana, las migraciones pueden generar una elevada tasa de crecimiento demográfico relativo. En algunos casos, la tasa de redistribución supera el 70 por 1000 anual, frente al 10 o 20 por 1000 habitual en





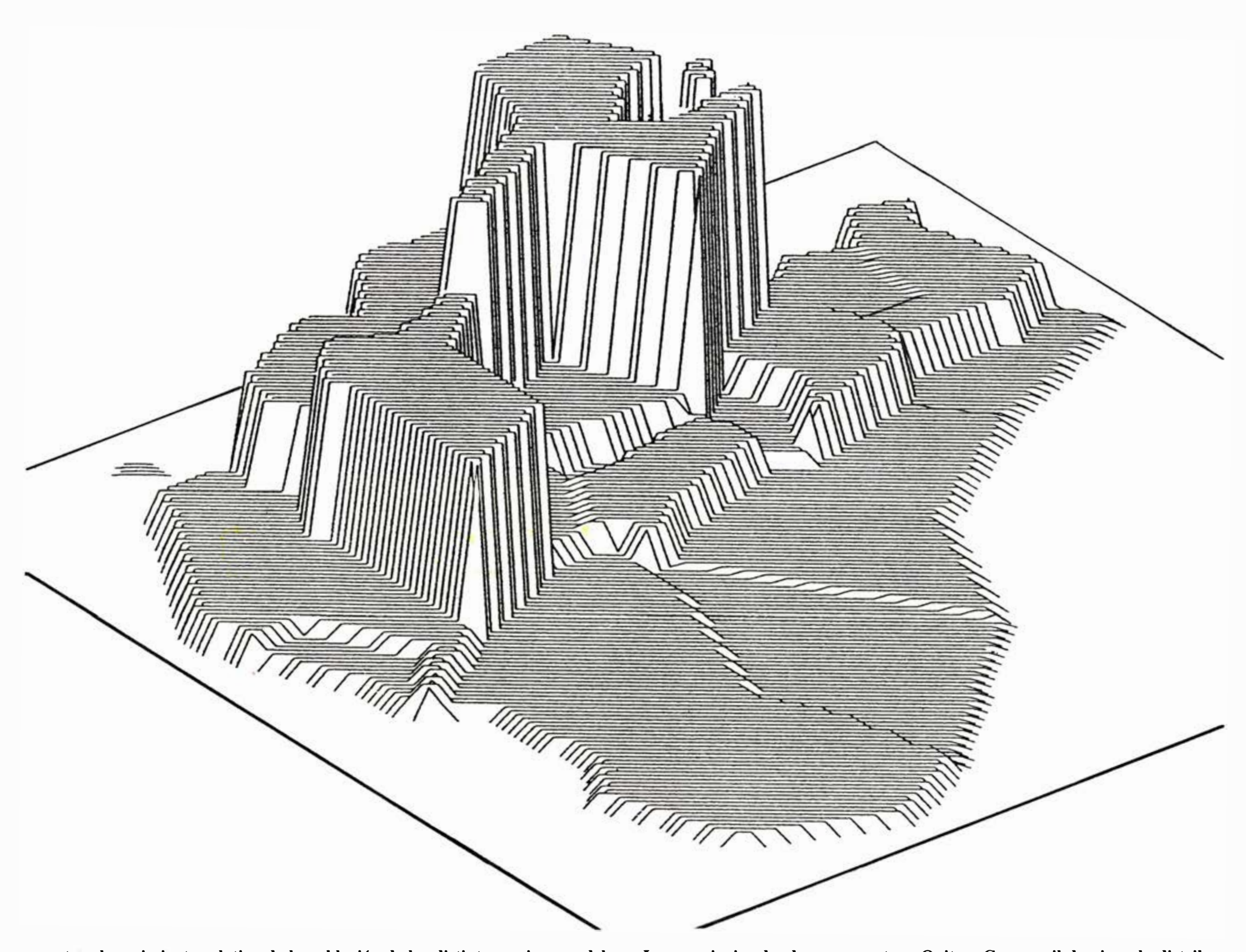
3. REGION CENTRAL DE ECUADOR. Atrae la población a un ritmo acelerado. El mapa superior izquierdo representa el centro, la zona central limítrofe y la periferia de Ecuador según los límites trazados por Richard W. Wilkie, de la Universidad de Massachusetts en Amherst. La región central de un país suele incluir buena parte de su industria y la mayoría de sus grandes ciudades. En Ecuador, el núcleo central comprende Quito, la capital, y Guayaquil, el primer puerto. El cuadro inferior izquierdo

los países en vías de desarrollo con una vasta región central dominante. Al ampliarse el núcleo central, esta tasa disminuye y posteriormente se estabiliza a un nivel más bajo. Es posible, por tanto, que el ritmo de redistribución se haga más lento en el futuro. Pero, de momento, las tasas de desplazamiento hacia el centro continúan siendo elevadas en el Africa subsahariana.

Varios factores demográficos contribuyen a intensificar los efectos desfavorables de los desplazamientos de la población hacia los núcleos centrales del Tercer Mundo. Uno de ellos es el hecho de que en la mayor parte de las regiones centrales del Tercer Mundo no abundan las ciudades. En los países industriales, la región central suele incluir varias grandes ciudades. En las naciones en vías de desarrollo, por el contrario, el núcleo central con frecuencia comprende una sola ciudad importante. De ahí que en estos países casi toda la migración hacia el centro venga a incrementar la población de una sola ciudad. Por otra parte, en las naciones en vías de desarrollo, la afluencia hacia el centro se produce con una tasa global de crecimiento demográfico considerablemente más alta que la que se registró en Europa o los Estados Unidos en el período de industrialización. En consecuencia, los países del Tercer Mundo tienen que hacer frente a dos problemas distintos aunque estrechamente relacionados: el rápido incremento de la proporción de la población nacional que reside en el centro y el de las dimensiones ingobernables que comienzan a alcanzar las grandes ciudades en términos absolutos.

Ecuador y Panamá ofrecen sendos ejemplos de espectacular y preocupante incremento de la proporción de población residente en el núcleo central en las últimas décadas. En 1952, las regiones de Ecuador que comprenden Quito, la capital, y Guayaquil, el puerto, incluían el 30 por ciento de la población nacional. En 1982, esta proporción era del 42 por ciento. De mantenerse la presente tasa de redistribución, al llegar al año 2000 más de la mitad de la población residirá en estas dos ciudades o sus proximidades. La proporción de la población panameña residente en la capital o sus alrededores pasó del 31 al 46 por ciento entre 1950 y 1980. De persistir la presente tendencia, en 1990 esta proporción habrá superado el 50 por ciento.

Los problemas de planificación derivados del brusco crecimiento, en términos absolutos, de las ciudades del Tercer Mundo quedan patentes en el caso de la región central de Indonesia: la vasta metrópolis llamada Yabotabek, con Yakarta como centro. En 1961, Yabotabek tenía una población de 6,7 millones de habitantes. Durante los veinte años siguientes, el crecimiento demográfico de esta región fue significativamente más alto que el del conjun-



muestra el crecimiento relativo de la población de las distintas regiones y del conjunto de la nación entre 1974 y 1982. El centro crece más rápidamente que el conjunto de Ecuador; el crecimiento de la zona limítrofe y la periferia es más lento. En el mapa trazado por ordenador de la derecha, obra de Wilkie y John Montgomery, la altura de cada provincia corresponde a su población. Las provincias donde se encuentran Quito y Guayaquil dominan la distribución demográfica. En países en proceso de desarrollo económico, como el propio Ecuador, el crecimiento de la región central parece tener en gran parte su origen a la concentración de la inversión, tanto pública como privada, que allí se produce, por la obvia rentabilidad de la propia infraestructura creada.

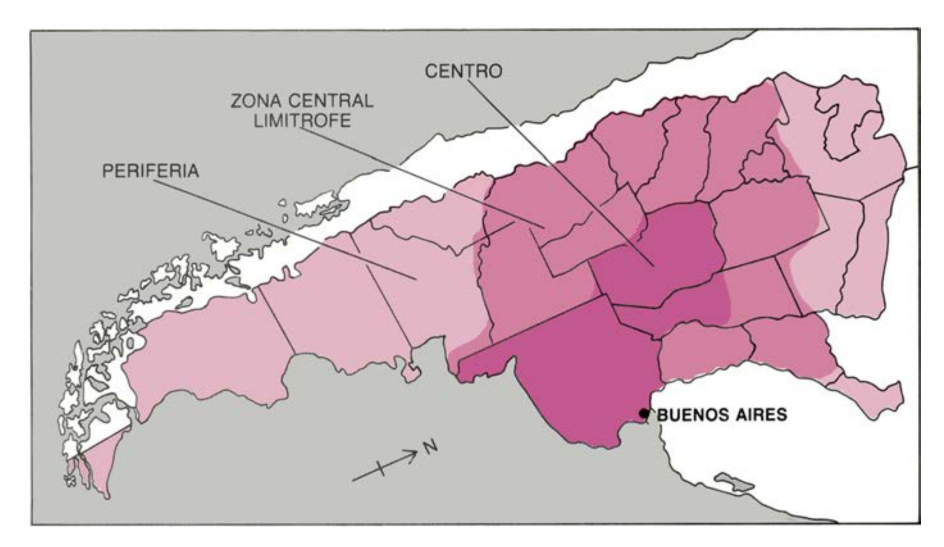
to del país, y al llegar a 1981 la región metropolitana contaba con una población de más de 13 millones de habitantes. Según estimaciones del Ministerio de Obras Públicas de Indonesia, en los próximos diez años el gobierno tendrá que dedicar más de 1200 millones de dólares a la creación de un sistema de transportes públicos para Yabotabek. Una cifra casi siete veces superior a la suma total destinada en el presupuesto nacional a todas las formas de transporte público en el conjunto del país para el período comprendido entre 1984 y 1988, inclusive. También se ha calculado que abastecer adecuadamente de agua, sólo a Yakarta, representará un coste equivalente al 60 por ciento de las inversiones públicas totales en suministro de agua en el conjunto del país bajo el reciente plan quinquenal del gobierno.

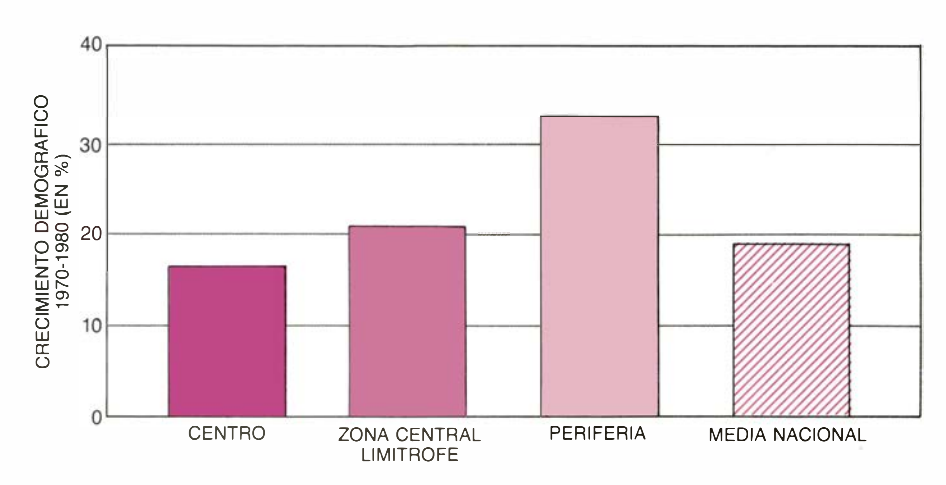
Aunque el coste de dotar de servicios públicos al núcleo central es elevado, los gobiernos de las naciones en vías de desarrollo están sometidos a considerables presiones que les aconsejan invertir su capital allí. Parte de las mismas tienen un carácter netamente político; la estabilidad política de la nación a menudo depende de que se logre frenar el malestar en el centro. El rápido crecimiento demográfico de las regiones centrales se traduce en la necesidad de dedicar grandes cantidades de dinero a mantener el funcionamiento del centro o a evitar, como mínimo, su total desorganización política. De ahí la tendencia a construir primero las escuelas, carreteras, transportes públicos y sistemas de comunicaciones, de abastecimiento de agua y de sanidad en la región central, antes que en la periferia.

Por otra parte, las inversiones públicas en el centro parecen ofrecer una rentabilidad mayor aún que su coste relativo. Servicios como los transportes y comunicaciones constituyen la infraestructura de la industria moderna. La existencia de esta infraestructura en la región central representa un importante atractivo para una compañía dispuesta a construir una nueva planta industrial. La industria, por tanto, gravita hacia el centro. Una vez se ha establecido allí un núcleo de empresas industriales, se incrementan aún más las ventajas que ofrece la construcción de una nueva planta en el mismo, dado el rendimiento de la localización de una planta en la proximidad de otras empresas capaces de abastecerla de partes y proporcionarle mercados, consultores y servicios subalternos. Además, el núcleo industrial va asociado a la existencia de una reserva de fuerza de trabajo relativamente cualificada.

Ante estas ventajas, que los geógrafos económicos denominan "economías de aglomeración", la empresa que busque emplazamiento para una nueva planta probablemente se inclinará por la región central. La apertura de una nueva planta industrial en el centro conlleva la creación de nuevos puestos de trabajo. La industria no es la única fuente de empleo en el centro en expansión. La creciente burocracia necesaria para administrar la inversión pública ofrece muchos puestos de trabajo; otro tanto sucede con la economía de servicios semilícita que encontramos en todas las grandes ciudades del Tercer Mundo. El trabajo en una planta industrial, en un despacho burocrático o en el mercado negro, proporciona un nivel de vida significativamente más alto que el que puede lograrse en la periferia, con sus amodorrados poblados campesinos y el lento desarrollo de las ciudades de provincias. El mayor nivel de vida representa un poderoso atractivo para los habitantes de las regiones periféricas, que acuden en masa a las grandes ciudades.

Si el nivel de vida relativamente elevado que prevalece en el centro es la fuerza impulsora subyacente de la concentración demográfica, cabe suponer que con una reducción de las diferencias entre el nivel de vida del centro y el de la periferia remitiría la afluencia de población al primero. Estas diferencias podrían mitigarse al menos de dos maneras. La primera es una desaceleración del crecimiento económico en el centro y la segunda es un aumento del





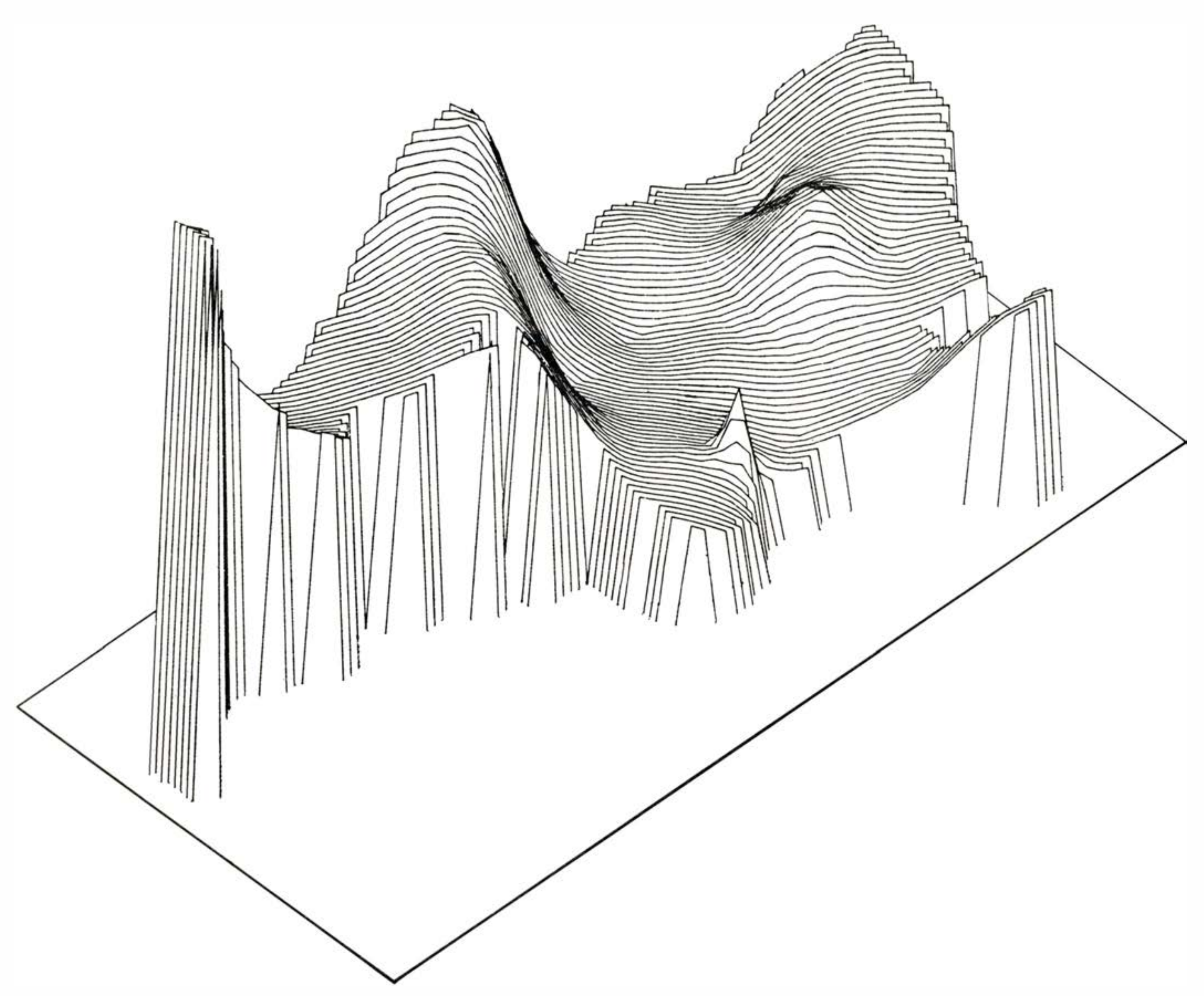
4. LAS REGIONES PERIFERICAS DE ARGENTINA están experimentando un mayor crecimiento demográfico que la central. El mapa superior izquierdo muestra el centro, la zona central limítrofe y la periferia de Argentina. El centro así definido comprende Buenos Aires y más de la mitad de la población nacional. El cuadro inferior izquierdo presenta el crecimiento relativo de la población en las tres regiones

nivel de vida en la periferia. Ambos modelos pueden observarse en algunas de las 46 naciones objeto del estudio.

Perú y Chile son países donde el crecimiento del centro parece haberse frenado a resultas del estancamiento económico. En los años 1970, Lima y Santiago experimentaron una tasa de crecimiento relativo aproximadamente un 50 por ciento inferior a la media del período que sigue a la Segunda Guerra Mundial. Probablemente la explicación más idónea de este declive sea el prolongado estancamiento económico que se inició a principios de la década de 1970 en ambos países y que todavía persiste. Pero el estancamiento económico sólo parece frenar la concentración demográfica en países que, como Perú y Chile, están dotados de una apreciable base industrial. En los países donde la industria es escasa, la tasa de migración a las ciudades puede ser independiente de las condiciones económicas. Por ejemplo, las economías de los países del Africa subsahariana no experimentan un rápido crecimiento, pero la migración a las grandes ciudades prosigue a un ritmo acelerado. Una explicación plausible de la permanente migración puede ser que el atractivo de las ciudades se debe a que los alimentos importados llegan a los centros urbanos en un momento en que está disminuyendo la producción alimentaria per cápita. Dadas las deficiencias del transporte entre el centro y la periferia en los países subsaharianos, una parte muy escasa de los alimentos importados llega a las zonas remotas del interior. Es probable, por tanto, que la acelerada migración se mantenga en tanto persista el declive de la base agrícola.

El ejemplo de los países subsaharianos sugiere que otros factores pueden modificar el efecto del crecimiento económico global sobre la concentración demográfica. Otro país con una influencia significativa de otros factores al margen del desarrollo económico general es Egipto. Con un nivel medio de desarrollo, cabría esperar que, de no variar otros factores, la población egipcia presentaría una elevada tasa de concentración. Más aún, el ritmo de crecimiento económico probablemente incluso se ha acelerado durante el período de postguerra y, en los últimos años, la renta per cápita ha experimentado un incremento del 4 por ciento anual. Pero, pese a esta expansión económica, la tasa de crecimiento relativo de El Cairo disminuyó marcadamente entre 1966 y 1981.

En el caso de El Cairo, es probable que el factor que modifica el impacto



y en el conjunto de la nación entre 1970 y 1980. La población de la periferia crece más rápidamente que la media nacional y más deprisa también que la población del centro. En el mapa trazado por ordenador de la derecha, la altura de cada zona corresponde al incremento proporcional de la población entre 1970 y 1980; el mapa es obra de Wilkie y Thomas Gallagher. Buenos Aires aparece en forma de pequeño pico en el borde inferior. La zona circundante a la capital revela el lento crecimiento del centro. Argentina es una de las naciones en desarrollo más avanzadas en el aspecto económico.

del crecimiento económico sea la densidad de población. La población de esta ciudad pasó de 3,6 millones a más de 10 millones de habitantes entre 1947 y 1981, transformando a El Cairo en una de las ciudades con mayor densidad demográfica del mundo. De hecho, las dimensiones y la densidad de la capital egipcia han alcanzado un punto en que su tamaño reduce las ventajas derivadas de la localización de una planta industrial en la región central. El hacinamiento, las congestiones de tráfico y la contaminación ambiental, en particular, probablemente han incrementado en un grado apreciable el coste de la actividad empresarial cairota.

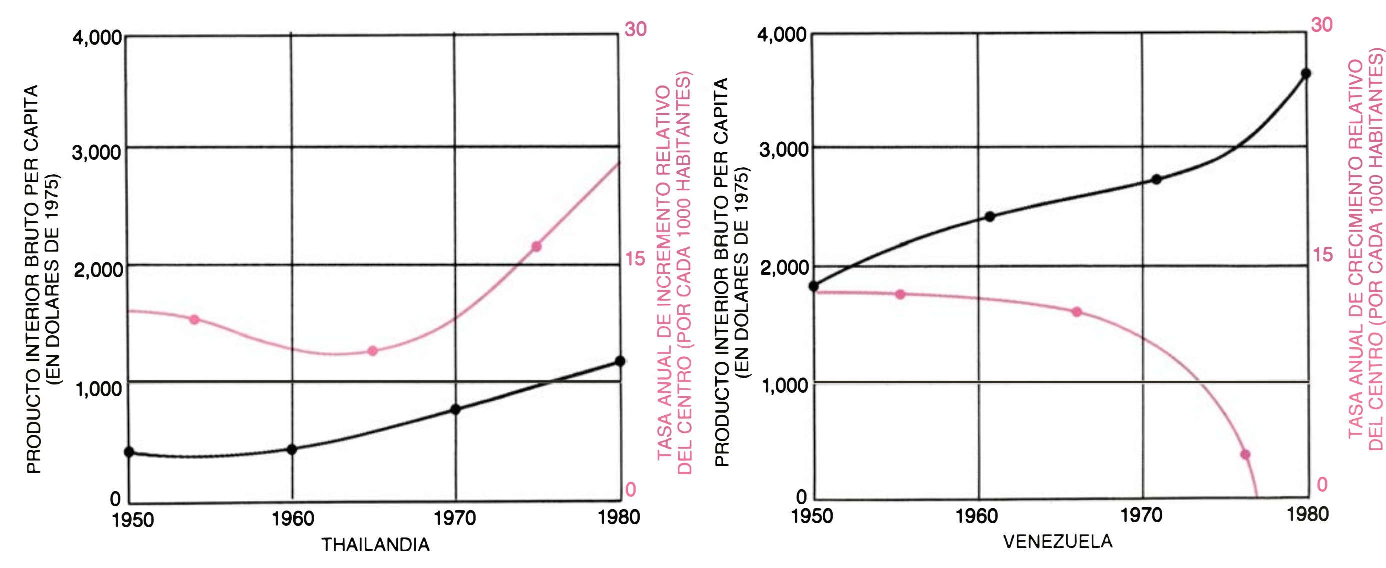
Perú, Chile y Egipto son países que han visto disminuir la tasa de concentración de la población a causa de una pérdida de atractivo del núcleo central. Por otra parte, la tasa de migración también puede disminuir como resultado de inversiones que mejoren el nivel de vida en las regiones periféricas. El capital disponible es escaso en el Tercer Mundo y la mayoría de las veces sólo es posible invertir en la periferia una vez alcanzado un nivel bastante avanzado de desarrollo económico. Sólo un pequeño número de países de la muestra estudiada ha conseguido un nivel de desarrollo que permita inversiones apreciables en la periferia. Entre ellos se cuentan Argentina, Venezuela, Grecia, España e Irlanda.

Estas cinco naciones constituyen un grupo de países en desarrollo "avanzados", con una producción económica a mitad de camino entre el Tercer Mundo y las naciones industriales de Europa occidental, Japón y los Estados Unidos. En 1970, el producto interior bruto (P.I.B.) per cápita –un excelente indicador de la producción económica nacional– de los cinco países osciló entre los 2618 dólares de Venezuela y los 3253 de España. (Los datos se han calculado en dólares de 1975 para compensar los efectos de la inflación.) Frente a ello, el P.I.B. per cápita de Indonesia en 1970 fue de 370 dólares de 1975 y el de Ecuador, de 984 dólares, también de 1975. A partir de 1970, los cinco países con un nivel relativamente avanzado de desarrollo experimentaron un fuerte descenso de la tasa de redistribución en favor de las zonas urbanas dominantes (Buenos Aires, Caracas, Atenas, Madrid, Barcelona y Dublín). El ejemplo de estos países ofrece una clara lección para el resto del mundo en vías de desarrollo: la superación de una determinada cota de producción económica total es condición suficiente para que disminuya la tasa neta de migración al núcleo central de un país. Esta cota parece situarse aproximadamente en un P.I.B. per cápita de 3000 dólares de 1975.

El modelo fundamental de migración de un país en vías de desarrollo no se modifica automáticamente cuando la producción económica alcanza un determinado nivel. Pero, una vez traspasado este umbral económico, el gobierno del país estará en condiciones de realizar inversiones significativas en las regiones periféricas. Se construyen carreteras, hospitales, escuelas, redes de comunicaciones y sistemas de saneamiento en zonas apartadas que antes no poseían ninguno de estos servicios. Ello aumenta el nivel de vida de los habitantes de la periferia. Al mismo tiempo, estos servicios constituyen la base de la infraestructura que atraerá a la industria hacia las regiones periféricas. Con la posibilidad de encontrar un empleo cerca de sus hogares, la capital, con sus embotellamientos de tráfico y sus humos asfixiantes, ya no resulta tan atractiva para los habitantes del campo o las ciudades de provincias.

Por consiguiente, una de las claves para reducir la tasa de migración hacia el centro es la dispersión de la infraestructura industrial en todo el territorio nacional. En el Tercer Mundo, esta dispersión parece darse en una fase relativamente temprana del desarrollo económico, en comparación con lo ocurrido en Europa occidental, Japón y los Estados Unidos. En muchos de los países industriales, la tasa de migración hacia el centro no empezó a reducirse de un modo apreciable hasta la década de 1970, cuando su producción económica era ya muy superior a la que presenta hoy cualquier zona del Tercer Mundo.

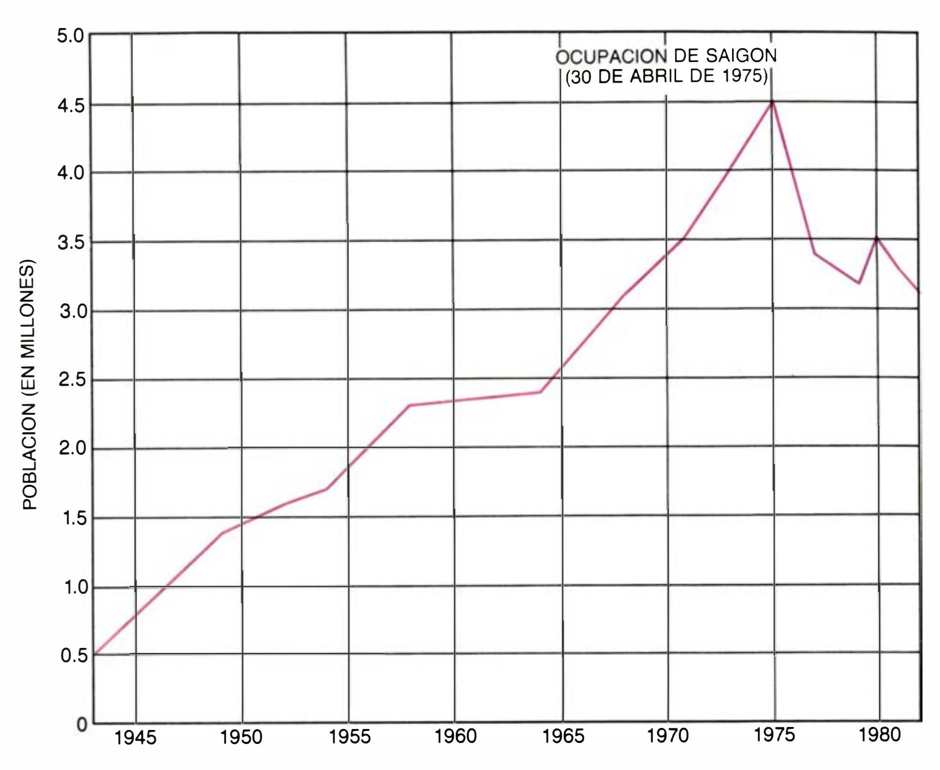
En Japón, por ejemplo, la tasa neta de migración a la región central que se extiende entre Tokyo y Osaka no empezó a disminuir significativamente hasta 1970, cuando el P.I.B. per cápita del país ya superaba los 4000 dólares de 1975. La tasa de migración a



5. COTA ECONOMICA a partir de la cual cabe un descenso de la afluencia de población hacia el centro; parece cifrarse en un producto interior bruto (P.I.B.) de unos 3000 dólares per cápita (en dólares de 1975). En los gráficos, la curva negra representa el P.I.B. per cápita. La de color señala la diferencia en la tasa de crecimiento demográfico del centro y la del conjunto de la nación. En Thailandia (*izquierda*), el desarrollo económico se sitúa en un nivel bastante bajo, pero comienza a ganar impulso; el crecimiento demográfico relativo del centro se está acelerando. En Venezuela (*derecha*), se alcanzó en los años 70 la cota de 3000 dólares per cápita; durante esa misma década se produjo una marcada disminución de la afluencia de población hacia el centro. Es posible que en la actualidad el crecimiento demográfico sea más lento en el núcleo central de Venezuela que en el conjunto de la nación. Una vez alcanzada una determinada cota económica, una nación puede aumentar las inversiones en la periferia, reduciendo los incentivos de un traslado al centro.

los núcleos centrales de Dinamarca y Suecia comenzó a reducirse en la misma época; el P.I.B. per cápita de estos países era entonces de más de 5000 dólares. En cambio, en las naciones en vías de desarrollo la cota de desaceleración del flujo migratorio parece situarse sólo en unos 3000 dólares de 1975, y esta cifra todavía parece estar disminuyendo. Los últimos datos sobre Taiwan hablan de un rápido descenso de la tasa neta de migración a la región de Taipei aproximadamente a partir de 1980; ese año el P.I.B. per cápita de Taiwan fue de unos 2500 dólares de 1975.

Esta dispersión temprana de la infraestructura por toda la periferia en los países del Tercer Mundo, en comparación con lo ocurrido en las naciones industriales, es posible gracias a las innovaciones tecnológicas, que han rebajado el coste de construcción de los sistemas que integran la infraestructura. En particular, ha disminuido el coste de construcción de redes de transporte y comunicaciones, lo cual permite a los gobiernos de las naciones en vías de desarrollo construir estos sistemas en una fase más temprana de su desarrollo, que no habría sido posible en las naciones de más antigua industrialización.



6. MEDIDAS ESTATALES pueden invertir el ritmo de crecimiento de las grandes ciudades, como indican los datos correspondientes a Ciudad Ho Chi Minh (antes Saigón). La población de Saigón comenzó a aumentar rápidamente a partir del año 1940 y alcanzó unos 4,5 millones de habitantes en 1975. Tras la ocupación de la ciudad por el ejército norvietnamita, el 30 de abril de 1975, se procedió a una reducción forzada de la población. A principios de nuestra década, Ciudad Ho Chi Minh sólo contaba con unos tres millones de residentes. Casi todas las restantes capitales del Tercer Mundo crecen deprisa. La pérdida de población por parte de esa ciudad vietnamita representa una importante inversión de la tendencia.

Aunque en la mayor parte de las naciones en vías de desarrollo las inversiones públicas en la periferia son escasas hasta que se alcanza la citada cota económica, la muestra estudiada ofrece una excepción a esta regla: el caso de Sri Lanka. El ejemplo de este país demuestra que es posible mejorar apreciablemente las condiciones de vida en las regiones periféricas incluso con un nivel bastante bajo de desarrollo económico. En 1980, el P.I.B. per cápita de Sri Lanka era de sólo 838 dólares de 1975. Sin embargo, el gobierno ha logrado ofrecer una práctica igualdad de acceso a los alimentos, la vivienda, la educación y la atención sanitaria en la totalidad del territorio nacional. A resultas de ello, Sri Lanka presenta una esperanza de vida excepcionalmente alta, una elevada tasa de alfabetización, una baja mortalidad infantil y muy poca desnutrición, en comparación con la situación de otros países con el mismo nivel de producción material.

La igualdad de acceso a los servicios fundamentales ha reducido la disparidad entre el centro y la periferia, eliminando aparentemente los incentivos para la migración interregional en Sri Lanka. Desde mediados de los años 1940, ha disminuido la proporción de la población nacional residente en Colombo, la capital, y sus alrededores. En 1946, un 21,3 por ciento de la población vivía en la región central; en 1981, esta proporción era de un 20,8 por ciento. Sin embargo, Sri Lanka puede haber pagado el precio de un menor crecimiento económico a cambio de la reducción de la migración. La producción económica per cápita del país ha crecido con bastante lentitud desde 1945. La economía sigue siendo agrícola en su mayor parte y la ausencia de una concentración de industria pesada ha contribuido a frenar la migración al núcleo central.

El ejemplo de Sri Lanka revela toda la complejidad del problema de la concentración demográfica. La concentración de la inversión en la región central, causa del flujo migratorio, es la vía más eficaz para aumentar la producción. Sólo puede desviarse la inversión del núcleo central a costa de un retraso en el crecimiento económico. Pero éste, evidentemente, es esencial para mejorar las condiciones de vida de los habitantes de un país. Los gobiernos de las naciones del Tercer Mundo se enfrentan, por tanto, a una difícil alternativa. Para facilitar sus decisiones se requeriría un medio capaz de frenar el crecimiento de los grandes centros urbanos sin detener al mismo tiempo el crecimiento económico.

Los países comunistas se enfrentan a las mismas difíciles alternativas, aunque en general se han inclinado por una opción distinta de sus homónimos no comunistas, a saber, rigurosas medidas restrictivas destinadas a limitar el crecimiento de las grandes ciudades. Estas políticas han dado buenos resultados. Por ejemplo, la proporción de la población cubana residente en La Habana es prácticamente la misma que había en 1943. Dean Forbes y Nigel Thrift, de la Australian National University, han aportado datos que indican que el gobierno de Vietnam ha logrado reducir la población de Ciudad Ho Chi Minh (antes Saigón) de 4,5 millones de habitantes, en 1975, a 3,1 millones en 1982. La tasa natural de crecimiento de Ciudad Ho Chi Minh fue probablemente de un 2 a un 3 por ciento anual entre 1975 y 1982, inclusive. Por tanto, el gobierno ha tenido que alejar a un 8 por ciento de la población de la ciudad cada año para conseguir una disminución neta de la misma. En China, la tasa de crecimiento demográfico más baja es la de las grandes ciudades de Beijing y Shanghai y las zonas circundantes.

El éxito prácticamente universal de los esfuerzos de los países comunistas para controlar el crecimiento de sus regiones centrales se debe en parte al monopolio del poder por parte del estado. El triunfo de una revolución comunista supone la supresión de instituciones como las iglesias y los sindicatos, que compiten con la autoridad del gobierno en los países no comunistas. La población de un estado comunista es particularmente penetrable a la intromisión estatal. Los miembros del partido, ampliamente distribuidos entre la población, se encargan de transmitir la información a las instancias superiores de gobierno. Una extendida red espacial capaz de controlar e informar sobre el movimiento de los individuos permite establecer un control gubernamental bastante riguroso sobre los movimientos globales de población.

En algunas naciones comunistas, la autoridad del aparato del partido se completa con la dotación de servicios públicos en las zonas alejadas de la región central. En este aspecto, los países comunistas se asemejan a Sri Lanka. La combinación de servicios públicos en la periferia y restricciones de los desplazamientos hacia el núcleo central se ha traducido en una política que incluye recompensas junto a un riguroso control. Tal vez el ejemplo más inquietante de fuerte control por parte de un estado poderoso sea el de Kampuchea (entonces Cambodia). Tras el triunfo de los khmeres rojos en 1975, se procedió a la evacuación forzosa de la capital nacional, Pnom-Penh, y también de las capitales provinciales. Unos tres millones de personas, esto es, la mitad de la población del país, fueron dispersadas y obligadas a trabajar en el campo. Se calcula que entre uno y dos millones de kampucheos, aproximadamente el 20 por ciento de la nación, murieron en el curso del proceso de dispersión de la población.

La mera existencia de una rigurosa política gubernamental de control del movimiento de población hacia el núcleo central no garantiza por sí sola el equilibrio demográfico. En este sentido, es útil comparar los casos de Vietnam y Kampuchea con el de Indonesia. En 1970, el gobernador de Yakarta la declaró ciudad "cerrada". Sin embargo, en los diez años siguientes se registró la máxima tasa de redistribución en favor de la región de Yakarta de toda la historia del país. En vez de contener el crecimiento del núcleo central, la política de cierre de Yakarta (si llegó a tener algún efecto) sólo sirvió para desviar el crecimiento demográfico hacia los distritos colindantes. Los barrios periféricos de Yakarta crecieron muy deprisa durante la década de 1970, en una reproducción de la pauta observada en los alrededores de Ciudad de México, Seúl, São Paulo, Taipei, Bombay y Manila. A diferencia de los gobiernos comunistas, con sus disciplinados cuadros, los estados no comunistas no suelen contar con una fuerte presencia local en el territorio que administran. Los movimientos de la población, por tanto, escapan a todo control.

¿Qué puede enseñarnos el presente estudio sobre la concentración demográfica en el Tercer Mundo? La primera conclusión general es que, en los años 1970-1979, la mayoría de las grandes regiones metropolitanas de los países en vías de desarrollo continuaron atrayendo población al mismo ritmo acelerado de las dos décadas precedentes. La permanente migración hacia las regiones centrales sugiere que la concentración de la industria y la población todavía ofrece considerables ventajas. Sin embargo, el ritmo de concentración ha disminuido en un número de países suficiente para autorizar algunas conclusiones sobre las condiciones que facilitan la contención del crecimiento del núcleo central.

Una depresión económica puede limitar la migración hacia el centro, como ocurre en los casos de Perú y Chile, y también puede lograrse el mismo efecto mediante medidas restrictivas impuestas por un estado fuerte, como en el caso de Vietnam y Kampuchea. Mas para los encargados de definir la política a adoptar ofrecen mayor interés aquellos países que han controlado el flujo migratorio a través de una mejora de las condiciones de vida de los residentes en la periferia. En la mayoría de los casos, esta mejora sólo se produce una vez alcanzada una determinada cota de producción económica. No obstante, el ejemplo de Sri Lanka evidencia que incluso un país pobre puede mejorar la calidad de vida en la periferia. La experiencia de Sri Lanka también indica que esta mejora puede obligar a sacrificar apreciablemente el crecimiento económico. La principal lección que se desprende del presente estudio es que, en el mundo no comunista, la concentración demográfica parece ser una concomitante casi inevitable del crecimiento económico. Un gobierno que preste atención a las vastas extensiones del país alejadas de las brillantes luces de la capital, podrá mitigar algunos de los efectos adversos de una rápida concentración, pero las alternativas no son fáciles y todas tienen su precio.

Los puntos calientes de la Tierra

Estas plumas de roca caliente que ascienden desde la profundidad del manto son una pieza clave en el ciclo de la tectónica de placas. Los volcanes y las mesetas mesoceánicas nos hablan de su existencia

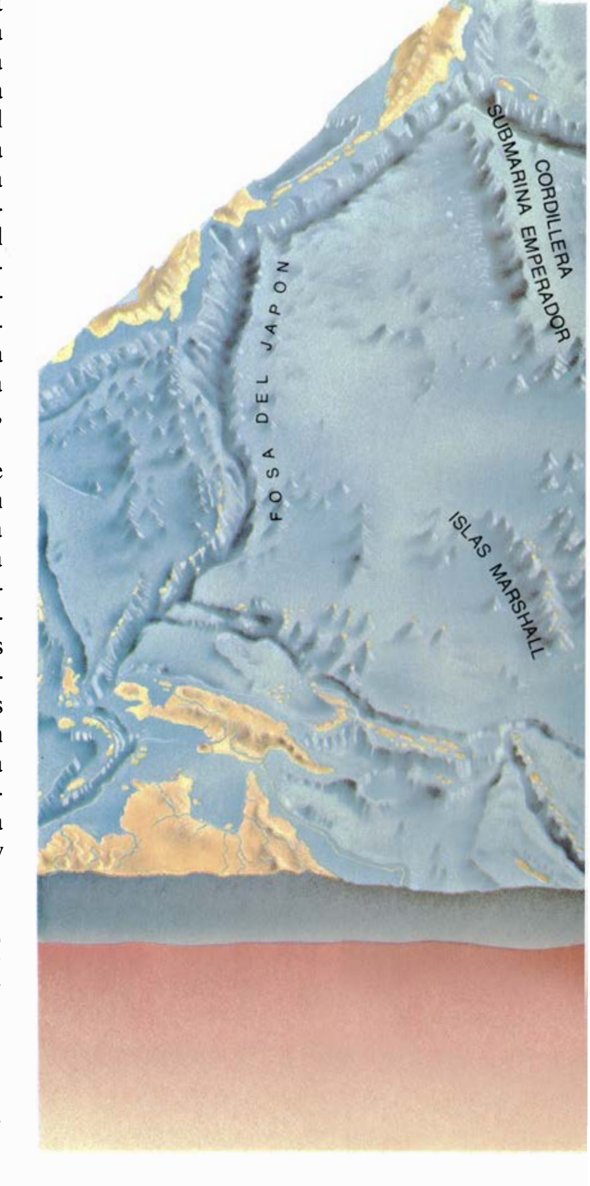
Gregory E. Vink, W. Jason Morgan y Peter R. Vogt

Desde la profundidad del interior del manto terrestre, delgadas columnas de roca caliente suben lentamente hacia la superficie; en su avance, empujan la corteza y forman volcanes. Las plumas se distribuyen por doquier, bajo continentes y océanos, lo mismo en el centro de las placas que forman la capa externa de la Tierra que en las cadenas mesoceánicas, que separan dos placas. El rastro que dejan en la superficie se superpone a los grandes efectos causados por el movimiento de las placas. Las erupciones volcánicas y los terremotos asociados a las plumas se desarrollan lejos de los límites de las placas, lugares habituales de esta suerte de actividad. Las corrientes ascendentes crean también amplios abombamientos anómalos en el fondo oceánico y en la superficie de los continentes. Estas zonas singulares de actividad geológica se conocen por puntos calientes.

Sobre las plumas del manto, bastante estacionarias, derivan las placas de la corteza. El paso de una de éstas sobre un punto caliente crea frecuentemente la alineación de rasgos superficiales cuya distribución revela la dirección que la placa ha seguido en su movimiento. Si se trata de una placa oceánica, la trayectoria del punto caliente puede estar representada por una cadena volcánica continua o por una cadena de islas volcánicas y montes submarinos, que se alzan sobre el fondo oceánico circundante. Las islas Hawai constituyen el ejemplo más claro. A raíz de una visita a estas islas, J. Tuzo Wilson, de la Universidad de Toronto, proponía en 1963 la idea de puntos calientes.

Wilson advirtió que, hacia el oeste de Hawai, atolones y bajíos sustituían a las islas, lo que indicaba una erosión mayor sufrida por aquéllos y, en consecuencia, una mayor antigüedad de los mismos. Idéntica observación había hecho, cien años antes, el geólogo americano Janes Dwight Dana, pero fue Wilson quien vio en la progresión de edad una prueba de la deriva continental. En su opinión, la cadena de islas se había formado por el movimiento hacia el oeste de una placa de corteza sobre "una corriente de lava fundida", subyacente ahora al archipiélago hawaiano, en el extremo oriental de la cadena. La idea brotó en un momento en que los libros de texto, incluido uno en que había participado el propio Wilson tres años antes, aludían a la deriva continental como una sugestiva idea avanzada en la década de los 20, caída luego en descrédito.

En las dos últimas décadas la idea se ganó la aceptación general, inscrita en el contexto de la teoría de la tectónica de placas. Se admite hoy que la corteza terrestre se halla inmersa en placas rígidas de la litosfera, que bajo los continentes posee entre 100 y 150 kilómetros de espesor y casi la mitad bajo los océanos. El constante movimiento de las placas sobre la astenosfera (la porción del manto que se extiende hasta una profundidad aproximada de 200 kilómetros) parcialmente fundida, explica el desarrollo de las cuencas oceánicas y la formación de las cordilleras. La geofísica contemporánea tiene ante sí un duro desafío: comprender cómo estos procesos superficiales se relacionan con el lento deslizamiento convectivo de rocas calientes en el manto subyacente. Los puntos calientes constituyen parte importante de esta conexión.



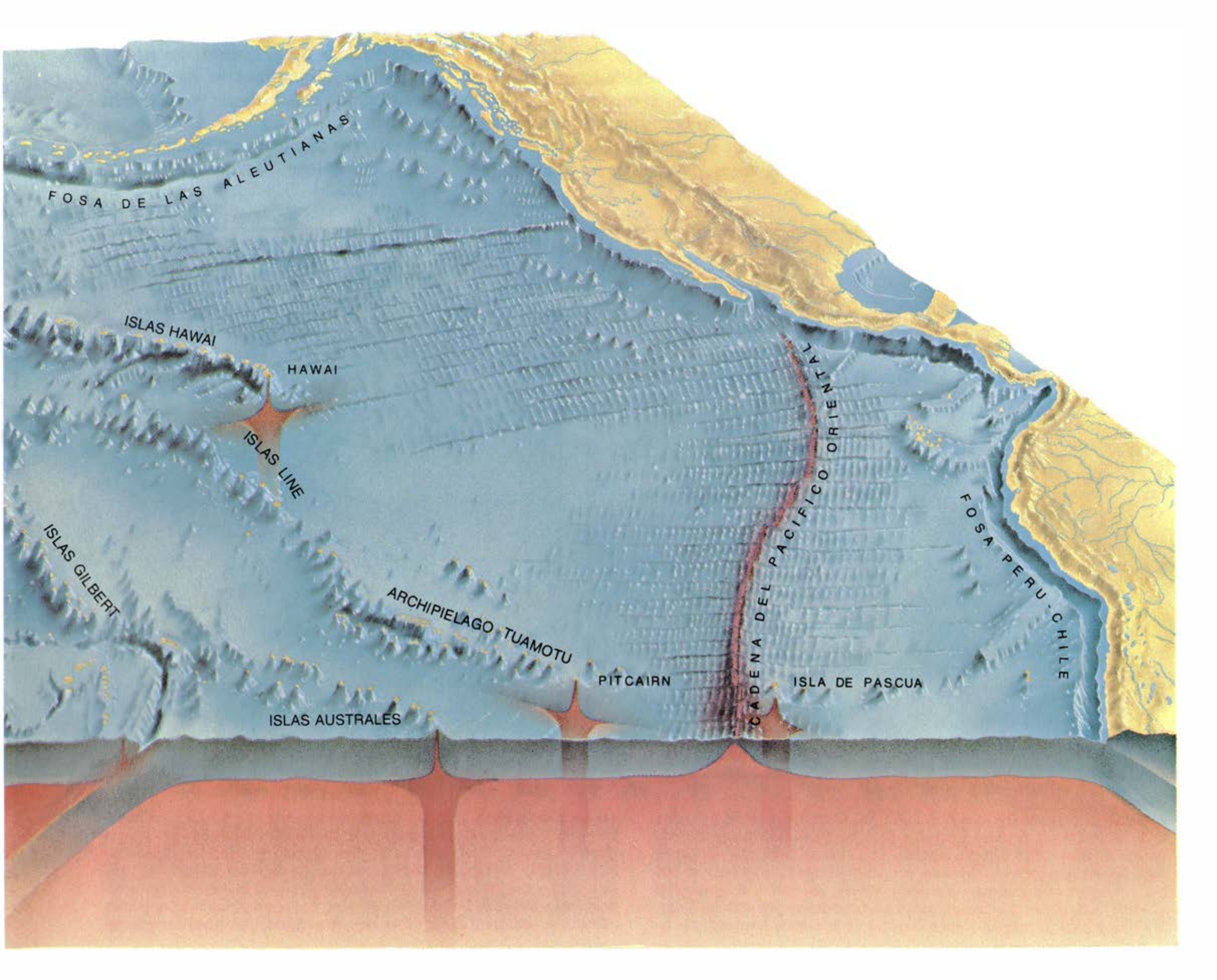
1. MOVIMIENTO DE LA PLACA DEL PACIFICO sobre tres plumas fijas en el manto. Ha generado tres cadenas paralelas de islas: Hawai y la cordillera submarina Emperador, las islas Tuamotu y Line, y las islas Austral, Gilbert y Marshall. La disposición de estas cadenas en el centro de la placa prueba que se formaron por mecanismos diferentes de los que generaron los arcos de islas volcánicas en el oeste del Pacífico, que se asocian a la subducción de las placas en las fosas oceánicas. Las plumas originadas en la profundidad del manto y sus trayectorias en la superficie revelan el curso seguido por las placas. Hace aproximadamente cuarenta millones de años, la placa del Pacífico viró hasta su actual trayectoria, hacia el oeste, desde un curso más septentrional; este cambio se manifiesta con una curva en las cadenas de punto caliente. Los volcanes activos, tales como el Kilauea en Hawai, se encuentran en el extremo sudeste de las cadenas; hacia el noroeste los volcanes están extinguidos y son progresivamente más antiguos.

Por cierto, si el ascenso de las plumas se suspendiera, las placas se pararían entre grandes estruendos. En última instancia, la energía que induce el movimiento de las placas es el calor liberado por la desintegración de los elementos radiactivos del interior del manto. Las plumas se convierten en un medio eficaz de canalización del calor hacia la superficie. Eficacia que se atribuye a cierto rasgo peculiar de las rocas del manto: su viscosidad se ve reducida drásticamente por el pequeño incremento relativo de la temperatura (se habla de unos 100 grados Celsius) o del contenido de elementos volátiles, verbigracia, el agua. El material de baja viscosidad producido por variaciones en la temperatura o del contenido en volátiles tiende a acumularse y a subir a la superficie a través de unos conductos angostos, como si fueran depósitos subterráneos de petróleo que ascienden a través de los tubos perforadores.

Pero sería falso afirmar que las plumas impulsan las placas. Son dos partes diferentes dentro del mismo ciclo convectivo. A medida que las placas se separan de una dorsal mesoceánica, las rocas fundidas surgen desde la astenosfera hacia el eje de expansión para formar corteza oceánica; la nueva litosfera se enfría a medida que se aleja de la dorsal y acabará destruida en las fosas oceánicas, donde dos placas entran en colisión y una de ellas se hunde en las profundidades del manto. El manto profundo alimenta las plumas; éstas vierten materia calentada por radiactividad dentro de la astenosfera, que sirve, a su vez, de fuente del nuevo suelo marino y se convierte en una capa, caliente y fluida, por donde se deslizan las placas. La astenosfera se destruye incesantemente conforme se enfría y se va agregando a la base de la litosfera; el límite entre las dos capas es, sobre todo, térmico. Si no la aprovisionaran las plumas, la astenosfera desaparecería pronto y cesaría el movimiento de las placas.

Merece la pena destacar que el "modelo de pluma" de circulación convectiva en el manto es justamente eso: un modelo. Las plumas no se han observado directamente. El manto profundo puede explorarse sólo a través del análisis de las ondas sísmicas; y, hasta ahora, la resolución de los estudios sísmicos no ha permitido detectar las plumas. Las corrientes ascendentes pueden alcanzar diámetros de cientos de kilómetros y difieren escasamente del entorno en lo relativo a la temperatura y densidad (propiedades que determinan la velocidad de las ondas sísmicas de una zona).

De cualquier modo, las pruebas indirectas de la existencia de plumas de manto profundo tienen su peso. La medición por satélite del campo gravitato-



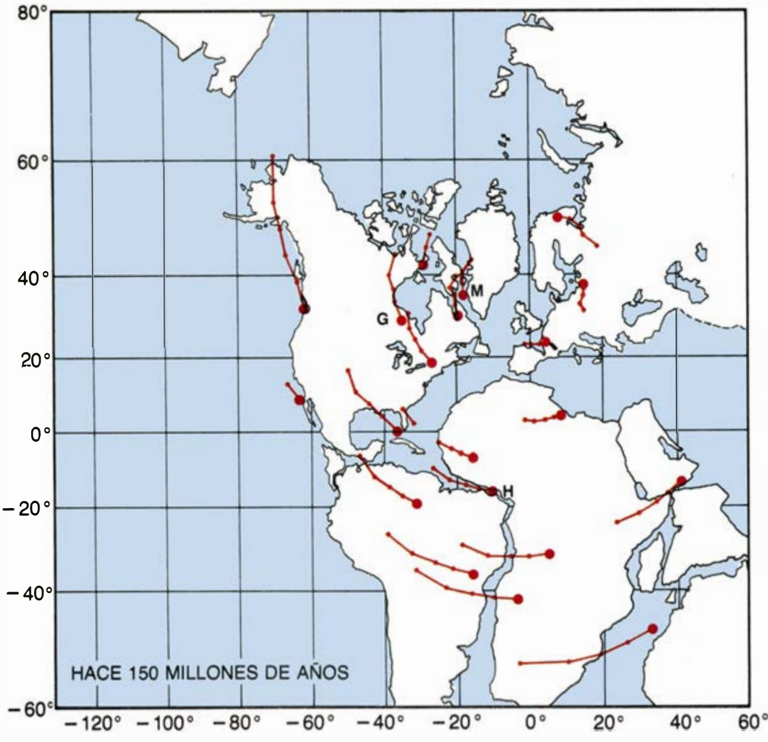
rio terrestre ha mostrado que los puntos calientes son zonas con altas anomalías de gravedad y, por tanto, exceso de masa; esta demasía se atribuye a los abombamientos de la superficie producidos por el empuje de las plumas. Una segunda línea argumental se apoya en los estudios geoquímicos de los basaltos eruptivos de volcanes de puntos calientes. Comparados con los basaltos dragados de las dorsales mesoceánicas, estas rocas se hallan enriquecidas en volátiles y en otros elementos (potasio, por ejemplo), que son "incompatibles" con los cristales de las rocas del manto. También contienen cantidades anómalas de isótopos derivados de la desintegración radiactiva. Las diferencias de composición sugieren que las lavas de puntos calientes proceden de rocas que emergen desde más abajo de la astenosfera, que alimenta los centros de expansión oceánica. De acuerdo con el modelo de pluma, a medida que el material procedente del manto profundo fluye hacia el interior de la astenosfera, la fracción rica en volátiles y otros elementos incompatibles se funde; parte del mismo ascenderá hasta la superficie en los volcanes de punto caliente.

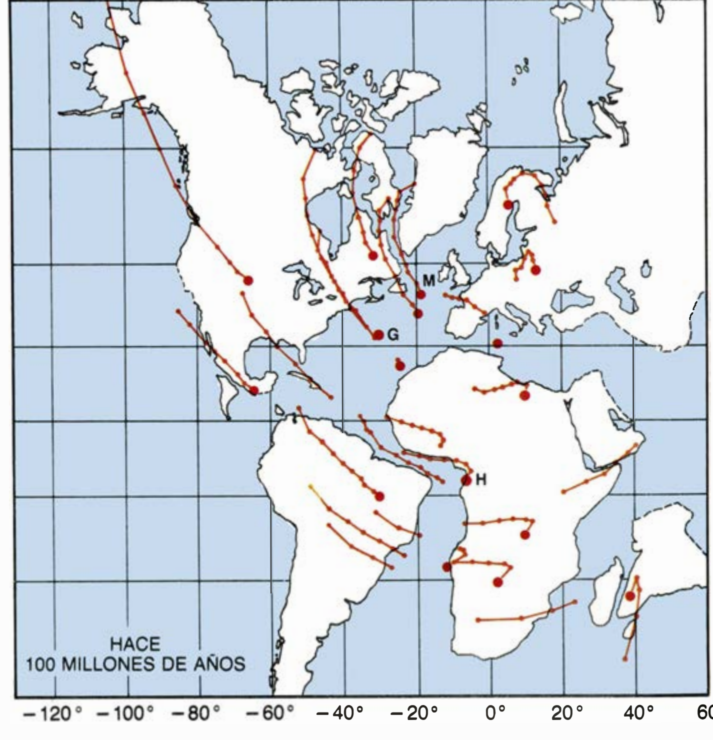
Los recientes avances en sismología avivan la esperanza de que algún día los investigadores tengan datos directos sobre la existencia de las plumas [véase "Tomografía sísmica" por Don L. Anderson y Adam M. Dziewonski, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1984]. En particular, la nueva red global de sismómetros que se ha propuesto podría mejorar la resolución de los estudios sísmicos en los puntos donde cabe determinar el tamaño de las plumas y la profundidad de sus raíces.

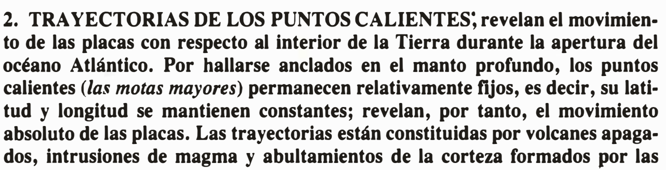
Las plumas no son uniformes. Por sus distintos contenidos isotópicos inferimos que arrancan de profundidades diferentes. Las comparaciones del volumen y frecuencia de las erupciones en diversos puntos calientes indican que también poseen varios tamaños. Además, las plumas, una a una, no son inmutables. Tras examinar el volumen de roca extruida a lo largo de la trayectoria del punto caliente de Hawai, uno de los autores (Vogt) postuló que el volumen de roca generado por una pluma variaba a lo largo del tiempo. Los datos geoquímicos disponibles apoyan esa hipótesis. Jean-Guy E. Schilling, de la Universidad de Rhode Island, propone que las plumas consisten en la subida de rocas en burbujas, no propiamente en flujos continuos.

A veces, desaparece un punto caliente y surgen otros nuevos. De su trayectoria deducimos la duración típica de la vida de una pluma, cifrada en torno a los 100 millones de años. La posición del punto caliente parece que cambia ligeramente; lo que justificaría que las trayectorias divisadas sobre la superficie no siempre alcancen la linealidad de la cadena hawaiana.

Con todo, comparadas con las placas, las plumas del manto son bastante estacionarias. La primera prueba de su carácter fijo se obtuvo en 1970. Uno de nosotros (Morgan) demostró que tres grupos de islas volcánicas del Pacífico (islas Hawai-cadena submarina Emperador, archipiélago Tuamotu-cadena de la isla Line y la cadena formada por las islas Austral, Gilbert y Marshall) corren casi paralelas y todas podían haberse formado por el mismo movimiento de la placa del Pacífico sobre tres puntos calientes fijos. En todo caso, la actividad volcánica más reciente se ha desarrollado cerca de la punta sudeste de la cadena; las islas y los montes submarinos se hacen progresivamente más antiguos en dirección noroeste. La placa del Pacífico se mueve actualmente en esa misma dirección; habiéndose desviado desde un






2. TRAYECTORIAS DE LOS PUNTOS CALIENTES, revelan el movimiento de las placas con respecto al interior de la Tierra durante la apertura del océano Atlántico. Por hallarse anclados en el manto profundo, los puntos calientes (*las motas mayores*) permanecen relativamente fijos, es decir, su latitud y longitud se mantienen constantes; revelan, por tanto, el movimiento absoluto de las placas. Las trayectorias están constituidas por volcanes apagados, intrusiones de magma y abultamientos de la corteza formados por las plumas ascendentes y, luego, transportados lejos por las placas. Cada circulillo menor representa el movimiento de la placa en 10 millones de años. Para la reconstrucción del movimiento de las placas se parte de una o dos trayectorias bien definidas; verbigracia, la del punto caliente del Gran Meteoro (*G*), que ha originado también los montes submarinos de Nueva Inglaterra y las intrusiones magmáticas de las montañas Blancas. Las trayectorias de otros puntos calientes se calculan a partir de las reconstrucciones, que deben acomodarse

curso más septentrional hace 40 millones de años. El cambio de rumbo se refleja en la curva que sufren las trayectorias de los puntos calientes.

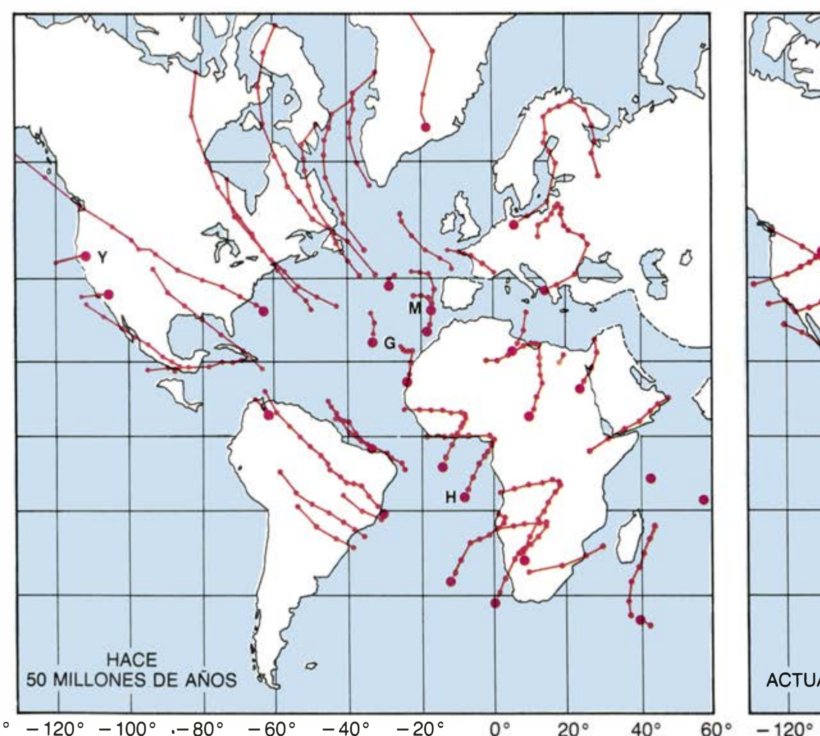
Por ser insignificante el movimiento de los puntos calientes, constituye un marco de referencia universal a la hora de reconstruir el trazado de los movimientos absolutos de las placas con respecto al interior de la Tierra. Los investigadores han cartografiado las trayectorias que han seguido unas placas en relación a otras, y así ha podido reconstruirse la apertura de las cuencas oceánicas. Los límites entre placas –dorsales y fosas– también se mueven, sin embargo; y así, los movimientos relativos no revelan en qué parte del globo estuvo la placa en ese momento dado. Tampoco detectan si dos placas divergentes se alejaron con la misma velocidad o si ha permanecido una de ellas estacionaria. Tales preguntas pueden contestarse al transformar los movimientos relativos conocidos en movimientos absolutos en el marco de referencia del punto caliente, donde cada punto caliente ocupa una latitud y longitud fijas.

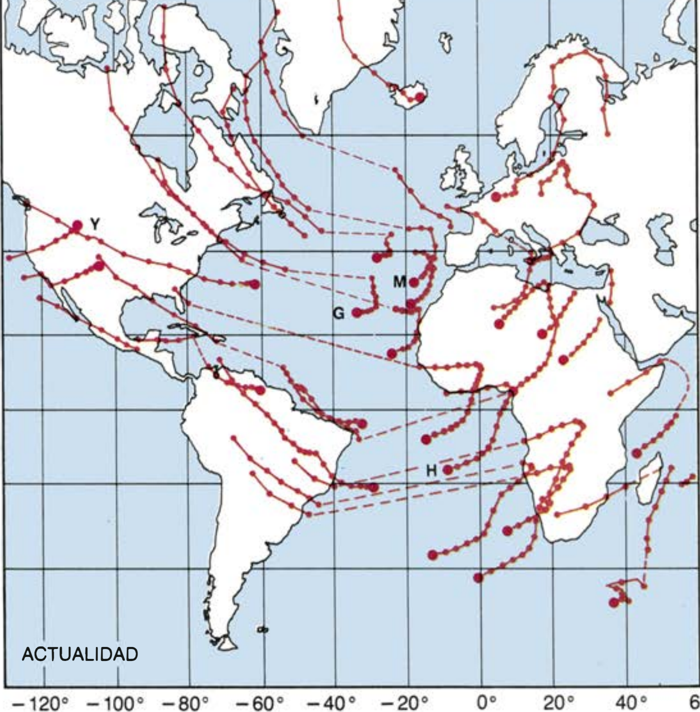
El movimiento relativo de divergencia de las placas –historia de la expansión del fondo oceánico– está determinado por el análisis de las anomalías magnéticas del fondo oceánico. A lo largo de la historia geológica, el campo magnético terrestre ha invertido su polaridad, por causas que no acabamos de conocer, a intervalos regulares que abarcan, por término medio, 100.000 años. El registro de estas inversiones se conserva en la corteza oceánica. Los minerales magnéticos de la lava que mana de las dorsales mesoceánicas se alinean según el cambio magnético predominante; a medida que la roca fundida se enfría y torna sólida, la dirección del campo queda permanentemente retenida en la corteza.

Inducida por el movimiento divergente de las placas, la corteza imantada se transporta en bandas casi paralelas al eje de la dorsal. Cada banda, que presenta una anomalía magnética característica, está constituida por corteza formada en ese momento; de ahí el nombre asignado a las bandas: isocronas magnéticas. La edad de diversas isocronas y, por tanto, la tasa de expansión del fondo marino, se ha establecido merced a la datación radiométrica de las rocas extraídas en sondeos de las profundidades del mar. La superposición de isocronas de ambos lados del eje de expansión permite reconstruir la posición relativa de las placas en el tiempo en que se formó la pareja de isocronas. (La verdad es que la superposición borra del mapa todo suelo marino creado con posterioridad a la inversión magnética que se considera.)

Si conocemos el movimiento de una placa por encima de las plumas, su movimiento relativo permite deducir las trayectorias seguidas por otras placas en el marco de referencia del punto caliente. De acuerdo con el procedimiento habitual se comienza con una trayectoria bien definida de punto caliente –por ejemplo una cordillera submarina– realizando el ajuste de las trayectorias más oscuras hasta que se consigue el "mejor de todos": el movimiento absoluto de placas que mejor satisfaga las condiciones impuestas por la existencia de puntos calientes y los movimientos relativos de las placas.

Usando este procedimiento, hemos reconstruido la apertura de los océanos Atlántico e Indico. La reconstrucción puede someterse a prueba: los accidentes que se suceden a lo largo de las trayectorias de los puntos calientes deben, por su naturaleza y edad, ajustarse a la hipótesis de haber surgido del paso de una placa por encima de una pluma ascendente. Lo que tendría que





al movimiento relativo de las placas que se deduce de la historia de expansión del fondo oceánico. Cuando la dorsal mesoceánica, que separa dos placas, deriva sobre una pluma, la trayectoria continúa sobre la otra placa, pero se interrumpe (*líneas discontinuas*) por la formación de suelo oceánico en la dorsal tras su paso sobre los puntos calientes. El movimiento de la placa es una rotación; por eso, la trayectoria se aproxima a círculos concéntricos más que a líneas rectas paralelas. A lo largo de las trayectorias de Madeira (*M*) y Sta. Elena (*H*), los continentes crearon luego fosas de hundimiento. Las plumas pueden facilitar los procesos de formación de rift (fosas de hundimiento) mediante adelgazamiento de la placa que pasa sobre ellas. En la llanura del río Snake, donde la litosfera perdió grosor con el paso del punto caliente situado hoy en Yellowstone (*Y*), quizás aparezca en el futuro una fosa de hundimiento. No todos los puntos calientes están presentes en cada una de las reconstrucciones, pues desaparecieron los más antiguos y aparecieron otros nuevos.



3. DORSAL MESOATLANTICA, ubicada hoy sobre varios puntos calientes. El flujo desde estas plumas se suma a la efusión normal de magma a través de la dorsal, provocando que la corteza adquiera mayor grosor. En el mapa topográfico trazado por computadora, las zonas marrones representan áreas someras; las verdes, profundas. Islandia se encuentra sobre el eje de la dorsal, con un gran punto caliente bajo su costa sureste; la pluma ha abombado y engrosado la corteza; ésta se alza por encima del nivel del mar. La estructura ahusada del segmento meridional de la dorsal de Islandia, la dorsal de Reykjanes, refleja el flujo del material de la pluma eje abajo. La similar topografía del suroeste de las Azores sugiere que el material procedente del punto caliente también fluye a través de la dorsal. El punto caliente de Islandia pudo haber formado la meseta sureste de Islandia (incluidas las islas Faeroes) mediante el abastecimiento hacia un eje de expansión, hoy extinto, en el centro del plateau. William F. Haxby, del observatorio geológico Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, ha elaborado el mapa con los datos recopilados por Joseph E. Gilg y Robert Van Wyckhouse, de la Oficina Oceanográfica de la Marina de EE.UU.

cumplirse no sólo con zonas que revelan trayectorias bien definidas, sino también con regiones donde las trayectorias se dedujeron a través del movimiento de las placas y de las pruebas de actividad de puntos calientes que no se había observado antes.

Aunque los datos disponibles son fragmentarios (en particular los relativos a la edad de los accidentes del suelo marino) las reconstrucciones pasan la prueba. Un buen ejemplo lo constituye la trayectoria de punto caliente que formó la montaña marina del Gran Meteoro, al sur de las Azores [*véase la figura 2*]. Hace doscientos millones de años, la zona noroeste de la bahía de Hudson, en el círculo Artico, se encontraba sobre la pluma del Gran Meteoro; 50 millones de años después, el punto caliente situábase bajo Ontario. La emersión del escudo canadiense, desde Manitoba hasta Ontario, cabe atribuirlo al levantamiento de la corteza por la pluma; en un área emergida existen muchas posibilidades de que los sedimentos que la cubren los erosione el tiempo.

Hace cien millones de años, la trayectoria alcanzó el joven y estrecho Atlántico, dejando atrás el Cabo Cod. Del paso de New Hampshire por encima del punto caliente nos hablan las intrusiones magmáticas en las rocas metamórficas de las montañas Blancas; las intrusiones tienen entre 100 y 124 millones de años de antigüedad. De 80 a 100 millones de años atrás, la trayectoria siguió la ruta de la Cordillera submarina de Nueva Inglaterra. Robert A. Duncan, de la Universidad estatal de Oregón, basándose en las dataciones radiométricas de las rocas de esa cadena montañosa, demostró que los volcanes que se encuentran a lo largo de la serie eran progresivamente más jóvenes conforme se avanzaba hacia el sureste. Estas edades coinciden con su paso sobre el punto caliente. A partir de las edades y distancias entre las montañas marinas, Duncan ha calculado la velocidad de la placa Norteamericana durante este período: alrededor de 4,7 centímetros por año.

Hace unos 80 millones de años, la dorsal Mesoatlántica comenzó su migración hacia el oeste sobre la pluma. La trayectoria del punto caliente continúa en la placa Africana, para finalizar en la montaña submarina del Gran Meteoro. En la actualidad el punto caliente posiblemente se halla a 500 kilómetros al suroeste del Gran Meteoro. Aunque existe un abombamiento del fondo marino en esta región, no hay

signos de actividad volcánica. Quizá la pluma cesó en su actividad.

Un abombamiento del fondo oceánico, al igual que la emersión de un escudo continental, representa un área de levantamiento cortical. Hace algún tiempo, Robert S. Detrick y S. T. Crough, entonces en la Universidad de Rhode Island, propusieron que las plumas no producían levantamientos por flexión de la litosfera; debíanse a que rocas de la astenosfera, calientes y ligeras, estrechaban y reemplazaban la litosfera fría y densa. Después de su paso sobre un punto caliente activo, el fondo marino y la plataforma continental se abomban y retornan a su altura original. Cabe al menos presumirlo. Estos abombamientos del suelo marino interrumpen los procesos por los cuales, al alejarse de la dorsal mesoceánica, la litosfera se enfría, engrosa, se hunde y acaba por penetrar en el interior de la astenosfera en una fosa.

Las anomalías de punto caliente no constituyen, en absoluto, interrupciones irrelevantes. Existen unos 40 puntos calientes activos y los abombamientos asociados presentan por término medio un diámetro de 1200 kilómetros; lo que en total viene a suponer alrededor del diez por ciento de la superficie terrestre. Estas observaciones se deben a Crough y Richard Heestand, de la Universidad de Princeton, que sugieren que la profundidad del fondo marino, en cualquier región, está controlada no sólo por el progresivo enfriamiento de la litosfera sino también por el tiempo transcurrido desde el paso de la región por encima de un punto caliente.

En este mismo sentido, los puntos calientes controlarían el grosor de la litosfera continental. Además, el adelgazamiento y debilitamiento de las placas continentales por las plumas del manto producen, a buen seguro, otros efectos más radicales que la emersión del basamento rocoso; verbigracia, abrir una fosa de hundimiento ("rift"). A principios de la década de los setenta, Kevin C. Burke, de la Universidad estatal de Nueva York en Albany, anunció que los puntos calientes iban asociados a los sistemas de rift de punto triple, dos de cuyos brazos formaban un límite de placa en tanto que el tercero se fallaba. Las fosas falladas originaban valles que se prolongaban hasta el interior de los continentes; sírvanos de ejemplo el valle del río Níger.

La reconstrucción de la apertura del Atlántico revela la aparición de numerosas trayectorias de puntos calientes a medida que los continentes se fueron fragmentando, millones de años después de que las placas pasaran sobre las plumas. La trayectoria de punto caliente que formó el archipiélago de Madeira, por ejemplo, cursa entre la costa occidental de Groenlandia y la oriental de las islas de Baffin y del Labrador; la pluma que creó Santa Elena puede rastrearse desde la costa meridional de Africa Occidental hasta la septentrional de Brasil. En el futuro, podría desarrollarse un rift en el llano del río Snake, donde la placa Norteamericana ha quedado debilitada a raíz de su paso por un punto caliente que se encuentra hoy bajo el Parque Nacional de Yellowstone.

Las plumas del manto explican satisfactoriamente la actividad geológica observada en el centro de las placas. Igual que éstas, también los límites de placa, incluidas las dorsales mesoceánicas, avanzan por encima de puntos calientes. Las dorsales no llegan a anclarse en el manto profundo. ¿Qué ocurre cuando una pluma se encuentra bajo un eje de expansión o en las proximidades del mismo?

La pluma que cae directamente bajo un centro de expansión fomenta el flujo de roca fundida que asciende desde la astenosfera para formar nueva corteza. La corteza situada encima del punto caliente adquiere así mayor grosor que a lo largo del resto de la dorsal; como resultado del proceso crea una meseta ("plateau"), elevada con respecto al suelo marino circundante. El mejor ejemplo lo constituye Islandia, isla de punto caliente que monta a horcajadas la dorsal Mesoatlántica; allí, el flujo ascendente es muy intenso y la corteza excepcionalmente espesa, por lo que la meseta se yergue por encima del nivel del mar. Desde el punto de vista geoquímico, la corteza de Islandia difiere netamente de la típica corteza oceánica. Los datos gravimétricos indican que el centro de la pluma se encuentra bajo la zona sureste de la isla. Las cumbres volcánicas son el signo del gran poder ascensional del flujo: hasta 1675 metros de altura, cubiertos por el glaciar de Vatnajökull. (En 1918, una erupción bajo el glaciar provocó una avenida de agua de deshielo 20 veces superior al caudal del río Amazonas.)

Parte del material de la poderosa pluma de Islandia parece extenderse bajo la litosfera. Esta se comba, hacia arriba, hacia el eje de expansión; ante ese dato, uno de nosotros (Vogt) propuso que el eje norte-sur de Islandia actuaría como una tubería que canalizara parcialmente las rocas fundidas desde el punto caliente. En ambas direcciones, a lo largo de la dorsal, el exceso de material de la pluma produce elevaciones topográficas anormales hasta 1500 kilómetros a la redonda. Hacia el sur de Islandia la anchura de la meseta se ahúsa para constituir la dorsal mesoatlántica. Esta estructura, en forma de huso, se debe probablemente a que las rocas fundidas de la pluma, ricas en volátiles, se consumen en las cercanías de Islandia. Schilling acaba de descubrir que la composición química de los basaltos dragados desde la dorsal se acerca progresivamente a la composición "típica" de la corteza oceánica conforme crece su distancia de Islandia; infiérese de ello que la relativa contribución del punto caliente mengua gradualmente con la distancia.

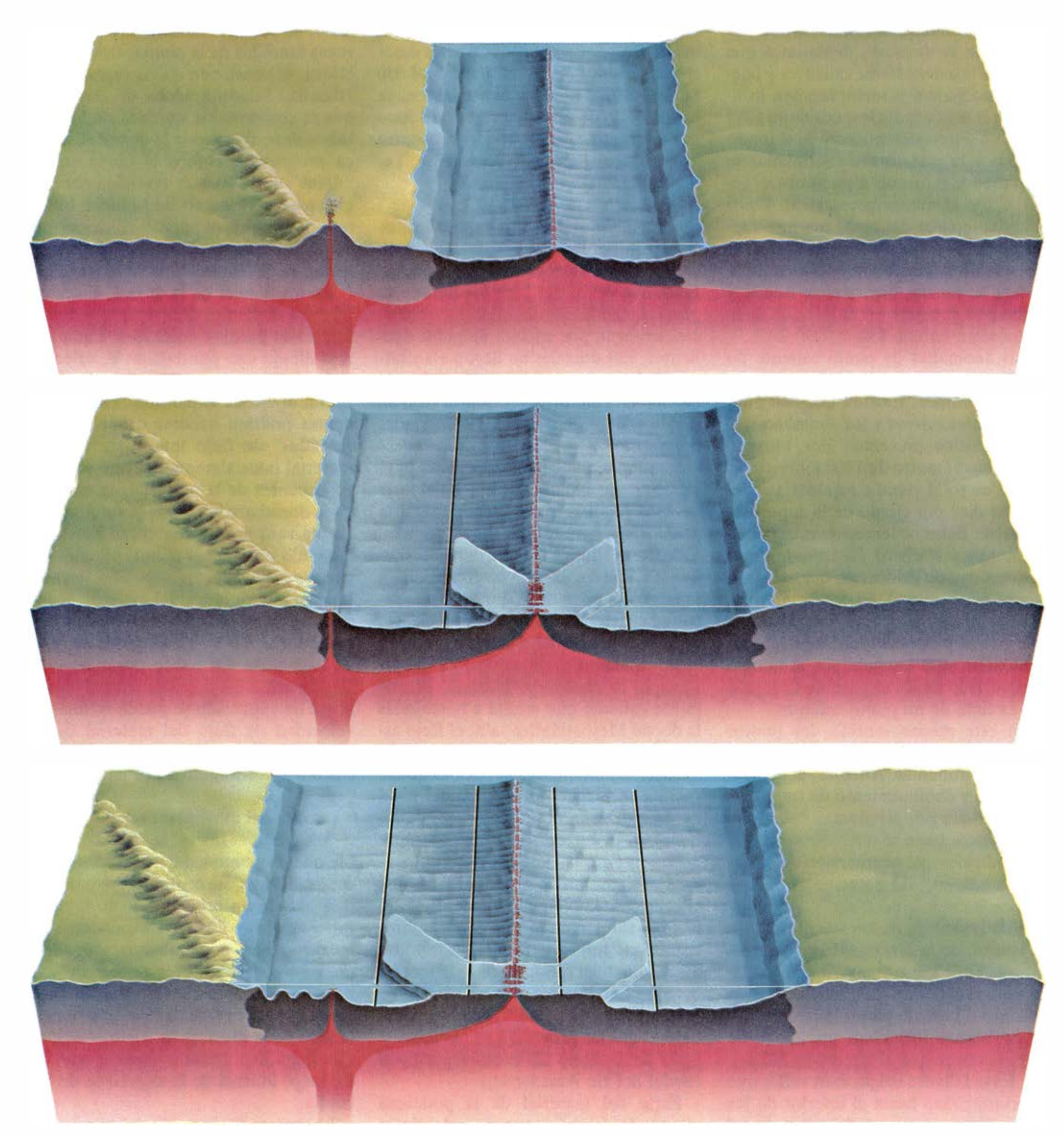
En los flancos de la dorsal, al sur de Islandia, hallamos dorsales secundarias formando parejas simétricas. Cada pareja dibuja una puntiaguda V, orientada hacia el sur, cuyo vértice se encuentra en el eje de expansión. Estos accidentes podrían haberse originado por "oleadas" de flujo intensificado o de material inusualmente caliente y ligero procedentes de la pluma. Una ola que viaje dorsal abajo podría generar cortezas de raro grosor comenzando por el área más próxima al punto caliente. La corteza, elevada, podría ser llevada lejos, a ambos lados del eje, por la expansión de las placas y originar dorsales secundarias en V. Conociendo la tasa de expansión del fondo oceánico y el ángulo entre las dorsales secundarias y el eje de expansión se puede estimar la velocidad de flujo del material de la pluma: fluye eje abajo a una razón de cinco a 20 centímetros por año.

A causa del movimiento de las dorsales mesoceánicas, es muy improbable que un punto caliente prolongue su estancia bajo un centro de expansión más allá de un breve intervalo temporal, a escala geológica. Entra dentro de lo razonable, sin embargo, que una pluma pueda abastecer un eje de expansión situado a cierta distancia, con tal de que esté cerca de la región donde la base de la litosfera se comba hacia el eje. Esta idea ayuda a explicar más de un rasgo inusual de la superficie de Islandia.

La meseta ("plateau") del que forma parte Islandia se extiende desde Groenlandia, por el oeste, hasta las islas Faeroes, al este. La sección del plateau que cae al este de Islandia y este del actual

centro de expansión ha confundido durante muchos años a los geólogos. Su estructura alargada sugiere su creación por un punto caliente. No obstante, podría ser que no se hubiese formado simplemente por el paso de una placa sobre una pluma fija, ya que su posición no coincide con la trayectoria del punto caliente de Islandia, que se conoce gracias a la reconstrucción del antiguo Atlántico. Algunos investigadores interpretan este hecho como un signo de que el punto caliente no ha permanecido estacionario, sino que ha cambiado continuamente su posición, formando la meseta en un ocasional ascenso a través de la placa. El argumento implica que las reconstrucciones son inadecuadas: si las plumas no están fijas, no pueden representar un marco de referencia válido para dibujar en el mapa los movimientos relativos de la placa sobre el manto.

Nuestra hipótesis sugiere que el punto caliente de Islandia ha permanecido estacionario y que la sección del plateau Islandia-Faeroes se formó con

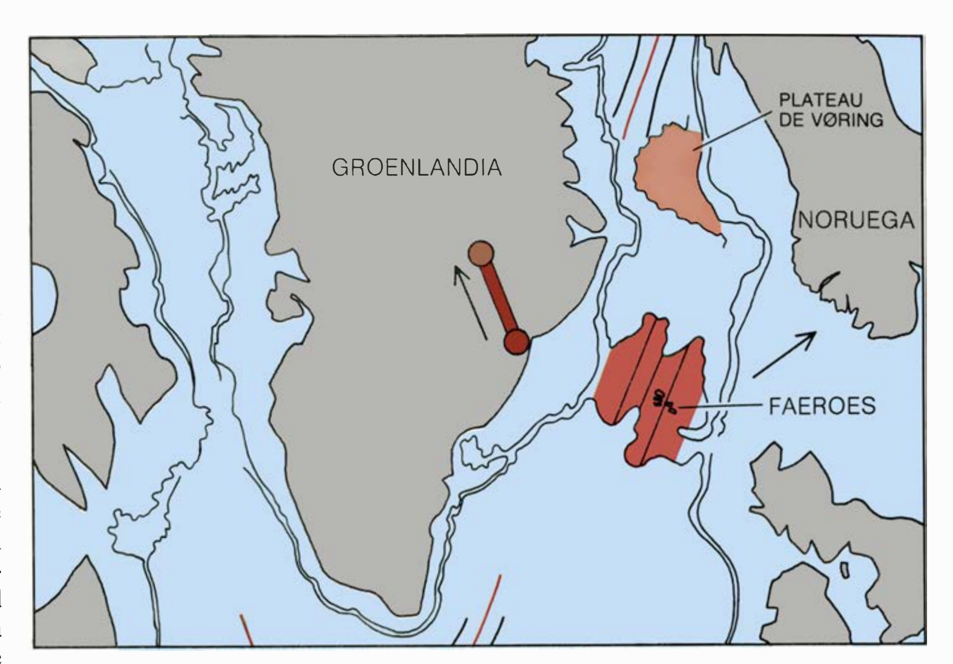


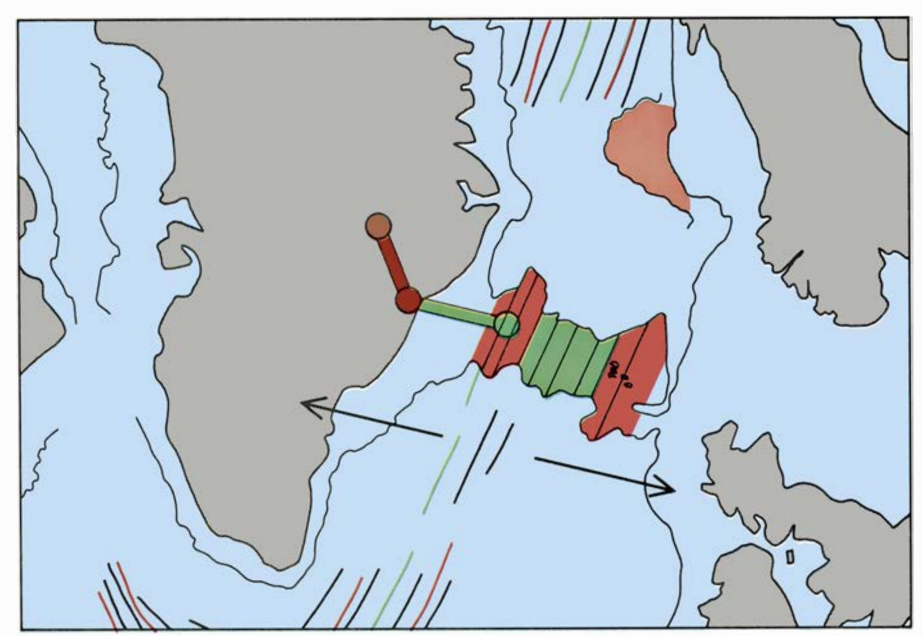
4. ASI ABASTECE EL PUNTO CALIENTE una dorsal: a distancia, engrosando la corteza y formando una meseta oceánica. En los inicios de la apertura de la cuenca (*arriba*) el punto caliente se encontraba bajo corteza continental, que avanzaba hacia el noroeste; el material de la pluma no podía alcanzar, todavía, el centro de expansión. Millones de años después (*centro*), el movimiento de las placas aproximó el punto caliente a la dorsal,superando la plataforma continental. El material de la pluma fluyó a través de la litosfera hacia la inmediata zona del talud. A medida que saltó material excedente, las placas se lo llevaron encima; la forma en V de la meseta resultante refleja la expansión de ambas placas desde la dorsal y el movimiento de éstas con respecto al punto caliente. Un cambio en el movimiento de la placa (*abajo*) forma una curva en la trayectoria del punto caliente y en el plateau (o meseta).

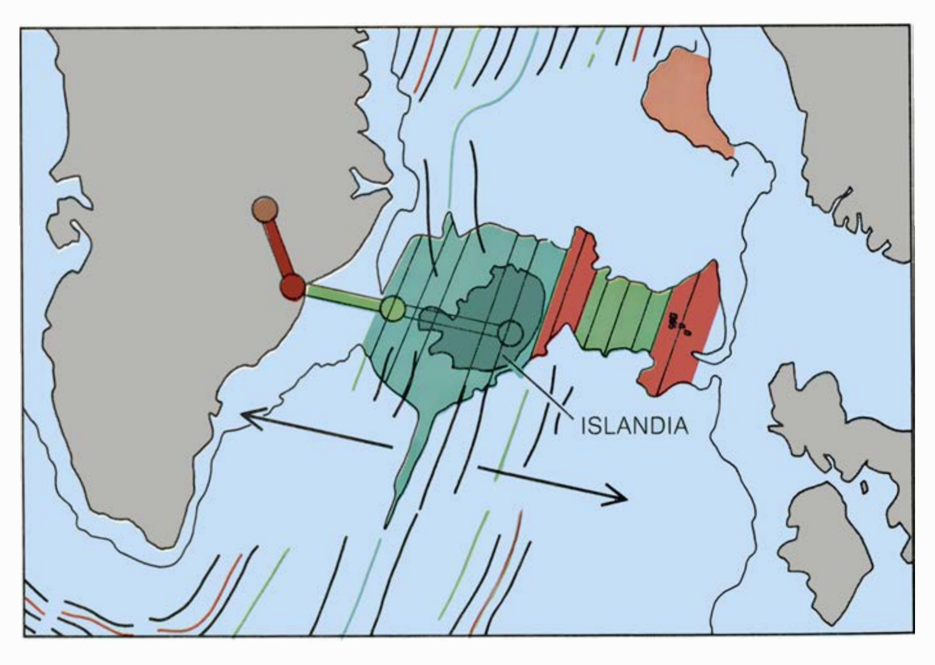
roca en sentido oriental que fluyó desde el punto caliente hasta el hoy inactivo centro de expansión. La hipótesis puede ser puesta a prueba. Presumiblemente la pluma podría alimentar el punto inmediato de la dorsal. Así, en cierto momento de la formación del plateau, una hipotética línea que representara la distancia más corta existente entre la pluma y la dorsal intersecaría el centro de la meseta. El plateau sería simétrico con el eje de la dorsal, pero no necesariamente perpendicular al mismo. Coń respecto al punto caliente, las placas podrían tener una componente de movimiento paralela al eje, y la orientación de la meseta se sacaría de la suma de dicha componente con el movimiento relativo de las placas (perpendicular al eje). Por último, la edad de cualquier punto del plateau debería ser la misma que la del circundante fondo marino, ya que los dos se formarían contemporáneamente. Ninguna de estas predicciones se cumpliría si el responsable de la formación del plateau fuese un punto caliente móvil que no estuviera abasteciendo la dorsal.

Para poner a prueba el modelo, uno de los autores (Vink) ha reconstruido la apertura del mar de Noruega-Groenlandia y la formación del plateau. El método es el mismo que se usó para reconstruir el antiguo Atlántico: la superposición de isocronas magnéticas revela la posición relativa que las placas ocuparon en el tiempo de una determinada anomalía conocida, en tanto que la trayectoria del punto caliente muestra el movimiento seguido por la placa en referencia a dicho punto.

En los comienzos de la apertura de la cuenca, remontémonos 50 o 60 millones de años, el punto caliente de Islandia se encontraba bajo el este de Groenlandia. Su trayectoria hacia el sur refleja el movimiento antípoda (hacia el norte) de la placa de Groen-







5. MESETA DE GROENLANDIA-FAEROES: pudo crearla el punto caliente de Islandia. Las líneas paralelas de color representan las isocronas magnéticas usadas para la reconstrucción de las posiciones que ocuparon las placas en el pasado. Hace 50 millones de años (*arriba*) el punto caliente subyacía a las costas de Groenlandia y comenzó a abastecer a la dorsal. La forma en V del plateau refleja la trayectoria seguida por el punto caliente. Hará unos 36 millones de años (*centro*), las placas torcieron su rumbo; el cambio aparece en el nuevo sector del plateau. Por ese tiempo, el eje de expansión se movió hacia el oeste sobre el punto caliente, que yacía bajo la litosfera oceánica. La expansión, producida por el abastecimiento desde el punto caliente, ha continuado en el oeste hasta ahora (*abajo*), formando Islandia. Al principio, cuando caía cerca de la parte norte de la dorsal, la pluma pudo haber construido el plateau de Vøring.

landia. El paso de la placa sobre la pluma causó probablemente la formación de las extensas masas de rocas volcánicas del suroeste del estrecho de Scoresby, cuya datación radiométrica les asigna una antigüedad de aproximadamente 55 millones de años. Hará unos 50 millones de años el propio escudo continental de Groenlandia avanzaba por encima del punto caliente. En ese momento, abundantes materiales procedentes de la pluma podrían haber empezado a fluir a través de la base de la litosfera oceánica hacia el centro de expansión, comenzando así la formación de la meseta. Las islas Faeroes, hoy en el extremo este del plateau, serían las primeramente creadas; sus basaltos tienen una antigüedad de entre 50 y 60 millones de años. En la reconstrucción de este período, el naciente plateau es aproximadamente simétrico respecto al eje de expansión y la forma en V de su margen norte refleja el movimiento hacia el norte de las placas con respecto al punto caliente.

Hace 36 millones de años, las placas torcieron su curso hacia el oeste, provocando que la trayectoria del punto caliente quedara desviada hacia el este. El cambio que esto produjo en la geometría de la meseta es manifiesto: la V se rompió por un joven segmento de dirección este-oeste, perpendicular al eje de expansión. El plateau permanece simétrico al eje; una línea trazada desde la posición del punto caliente interseca el eje en el centro de la meseta. Ambas observaciones indican que la pluma ha continuado abasteciendo de rocas fundidas la dorsal.

Por aquel entonces, el punto caliente cayó bajo la litosfera oceánica, algo más fina que la continental. La pluma podría haberla debilitado todavía más. De acuerdo con nuestro modelo, la dorsal se trasladaría entonces al área de litosfera debilitada, abandonando un extinto centro de expansión en la sección oriental de la meseta. Aunque la existencia de estos restos es todavía asunto de debate, la actividad geológica parece haber cesado en el este por la época en que el eje de expansión podría haberse trasladado hacia el oeste. Las rocas sondeadas en el centro de la región oriental tienen entre 40 y 43 millones de años de antigüedad.

La expansión del fondo oceánico continuó en el extremo oeste del plateau. Con el punto caliente instalado bajo el eje de expansión, el material de la pluma empezó a fluir eje abajo, confiriendo a la dorsal su actual estructura afilada hacia el sur. El movimiento hacia el oeste de las placas no tardó en arrastrar al eje lejos del punto caliente, pero la pluma continuó alimentando la dorsal. Los más antiguos afloramientos de Islandia se sitúan en las proximidades de las costas este y oeste, como cabría esperar en islas formadas a partir de un eje de expansión; sus edades sugieren que la isla surgió entre 16 y 12 millones de años atrás. Islandia desarrolla todavía actividad geológica. Los movimientos hacia el este del eje de expansión comenzados hace pocos millones de años han situado de nuevo la dorsal sobre el punto caliente.

La reconstrucción muestra que la inmovilidad del punto caliente de Islandia podría haber causado la geometría que presenta el plateau de Groenlandia-Faeroes. Igualmente podría haber formado el plateau de Vøring, aun cuando este último se encuentra a 500 kilómetros al norte de Islandia. La hipótesis descansa en la presunción de que la pluma abastecerá en todo momento la región inmediata de un eje de expansión. Justamente antes de la formación del plateau de Groenlandia-Faeroes, cuando el punto caliente se encontraba bajo Groenlandia, éste pudo haberse aproximado hacia un segmento septentrional de la dorsal; durante ese período, el fenómeno en cuestión pudo haber producido el plateau de Vøring. El movimiento hacia el norte de la placa de Groenlandia comporta el acercamiento del inmediato eje de expansión meridional hacia el punto caliente y, así, la pluma cambia de objetivo.

Al igual que el modelo de la tectónica de placas, la noción de punto caliente es un concepto sencillo y profundo. Explica muchos rasgos de la superficie terrestre que parecían injustificables. Nuevas investigaciones conducirán a la atribución de otros efectos a la existencia de plumas en el manto. No le falta a la noción la atracción de lo intuitivo. Basta con adornar un poco la realidad y sugerir que los hawaianos conocían la trayectoria de su punto caliente centurias antes de que estos atrajeran el interés de los geólogos. De acuerdo con la leyenda hawaiana, Pelé, diosa de ojos ardientes de los volcanes, moraba en Kauai, en el extremo oeste de la cadena de islas. Cuando el dios del mar la expulsó, se refugió en Oahu. Forzada nuevamente a huir, continuó su destierro hacia el este, a Maui, y, finalmente hasta las islas de Hawai. Ahora brama furiosa en el interior del cráter de Kilauea.

La liberación de acetilcolina

Conduce el impulso nervioso a través de la sinapsis. Estudios recientes en el pez eléctrico Torpedo *sugieren que la fuente de la acetilcolina que emite una neurona es el citoplasma y no las vesículas sinápticas*

Yves Dunant y Maurice Israël

El sistema nervioso es una estructura modular, cuyas unidades son las neuronas, o células nerviosas. Dentro de cada neurona, la señal conducida por el sistema nervioso pasa de un punto a otro virtualmente inalterada, mientras que, cuando la señal pasa de una neurona a otra, debe atravesar un espacio. En la mayoría de los casos, la transmisión a través de ese espacio tiene lugar mediante la liberación de un compuesto químico denominado neurotransmisor. Al llegar a una terminación nerviosa, el impulso desencadena la secreción de un neurotransmisor capaz de atravesar la hendidura y estimular la célula adyacente, permitiendo que así progrese el impulso. La acetilcolina es uno de los neurotransmisores principales. La comprensión del mecanismo en que se basa es fundamental para entender cómo funciona el cerebro y cómo actúan los fármacos sobre el sistema nervioso.

Durante muchos años, los neurobiólogos han considerado que la acetilcolina se liberaba de orgánulos esféricos de pequeño tamaño denominados vesículas sinápticas, localizadas en el interior de las terminales nerviosas. Se pensaba que, al estimularse una terminación nerviosa, las vesículas se fundían con la membrana terminal, liberando su contenido al espacio existente entre la neurona y el tejido con el que ésta comunica.

Nuestras recientes investigaciones contradicen esta simple descripción. Sugieren que, aunque las vesículas ciertamente almacenan acetilcolina y desempeñan un papel en su regulación intracelular, la acetilcolina que libera la terminación nerviosa no procede de las vesículas, sino directamente del citoplasma, que constituye el material fundamental interno de la neurona. Al parecer, un compuesto, muy posiblemente de naturaleza proteica, integrado en la membrana de la célula nerviosa, gobierna el mecanismo de descarga. Esta proteína podría actuar a modo de válvula que permitiera el paso de la acetilcolina a través de la membrana.

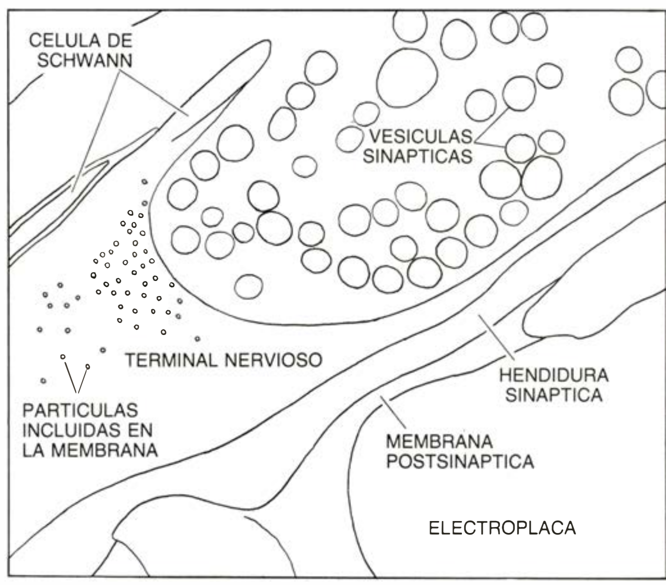
La estructura general del sitio donde ocurre tal proceso es muy similar en todos los animales, o en todos los tejidos de un mismo animal. Además, la transmisión de una señal desde una terminación nerviosa colinérgica (terminación nerviosa que emite acetilcolina con función neurotransmisora) no depende, al parecer, del carácter de la célula receptora, que tanto puede ser una fibra muscular como una célula secretora u otra neurona. Las terminaciones se encuentran en los extremos de largas y delgadas prolongaciones de las neuronas, llamadas axones, por lo que aquellas también se denominan terminaciones axónicas. Cualquiera de ellas, junto con la región especializada de la neurona que se halle en la inmediata vecindad a la terminal, y el espacio existente entre las células, se denominan, en conjunto, sinapsis, y el espacio propiamente dicho, hendidura sináptica.

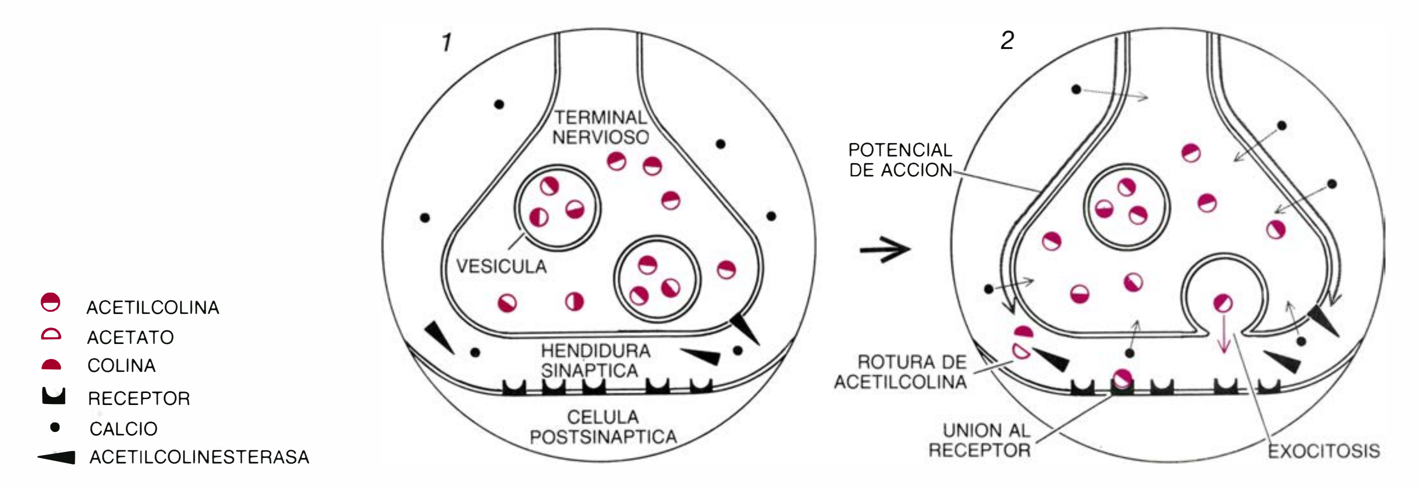
Un impulso eléctrico que se desplaza a lo largo del axón y llega hasta una terminación nerviosa inicia el proceso de liberación de acetilcolina. En una neurona en reposo existe una diferencia de potencial eléctrico de varias decenas de milivolt entre las caras interna y externa de la membrana celular. Al estimularse la neurona, se produce un cambio local en la resistencia de la membrana al paso de iones de sodio y potasio. Los iones de sodio penetran en la célula y, los de potasio, salen de ella. El intercambio de iones a través de la membrana genera un cambio característico en la diferencia de potencial local de la membrana; en otras palabras, una corriente eléctrica fluye a través de la membrana. El cambio local del potencial produce, a su vez, una disminución de la resistencia al paso del sodio y potasio en una región contigua de la membrana, en el sentido del flujo de la corriente eléctrica inicial hacia la terminación axónica. De esta forma, el cambio de potencial se propaga como una onda, denominada potencial de acción, que se mueve a lo largo del axón.

El cambio local de la diferencia de potencial de la membrana induce también la entrada de iones de calcio en la neurona. Cuando el potencial de acción alcanza la terminación axónica, el calcio que entra en la terminación desencadena la liberación de acetilcolina de la terminación a la hendidura sináptica. La acetilcolina se difunde a través de la hendidura sináptica y, parte de ella, se une momentáneamente a receptores de la membrana de la célula postsináptica, donde produce otro cambio local de la resistencia eléctrica. En las fibras musculares y en algunas neuronas el cambio no constituye más que el primer paso de la generación de otro potencial de acción: la fibra muscular se contrae o la señal nerviosa continúa su marcha. En otras células postsinápticas la respuesta puede ser inhibidora. A continuación, se descompone toda la acetilcolina en acetato y colina, por medio de una reacción catalizada por la acetilcolinesterasa, enzima que se encuentra en las caras externas de las membranas celulares y en la hendidura sináptica.

Para que la neurona transmita más de una señal, la terminación nerviosa habrá de renovar su contenido de acetilcolina. La síntesis de acetilcolina tiene lugar mediante la transferencia, a la molécula de colina, de un grupo acetilo del compuesto acetilcoenzima A. Los precursores químicos de la acetilcolina circulan por muchos tejidos, llegando fácilmente a las terminaciones axónicas. Por ejemplo, en la placa terminal, o unión neuromuscular, y en algunos otros tipos de sinapsis, tanto el acetato como la colina, procedentes de la descomposición de la acetilcolina externa de la terminación axónica, se reciclan en el interior de esta termina-

1. SINAPSIS del órgano eléctrico del pez *Torpedo marmorata* aumentada 106.000 veces, en la micrografía superior; el diagrama de la derecha identifica los componentes mayoritarios de la sinapsis. Al estimular la célula nerviosa, el terminal nervioso libera acetilcolina que atraviesa la hendidura sináptica y llega a las células del órgano eléctrico, las denominadas electroplacas. La acetilcolina induce la entrada rápida de los iones de sodio en la electroplaca, lo que da lugar a una descarga eléctrica repentina; la descarga defiende al pez y paraliza su presa. Se ha utilizado, para obtener la micrografía electrónica, la técnica de criofractura, que revela la cara interna de la membrana de la terminación nerviosa, rica en partículas de cinco a 20 nanómetros de diámetro. Las partículas pueden indicar la presencia de proteínas en la membrana; la proporción de partículas más pequeñas respecto de las más grandes cambia cuando se libera acetilcolina. Un corte oblicuo de la terminación nerviosa permite observar algunos orgánulos de mayor tamaño de la neurona, las vesículas sinápticas. Almacenan acetilcolina y, por mucho tiempo, se ha creído que la acetilcolina se liberaba al fundirse las vesículas con la membrana celular y verterse el contenido de aquellas en la hendidura sináptica. Los resultados de los autores sugieren ahora que esta visión debe modificarse o abandonarse. Luis Miguel García-Segura, Lelio Orci y uno de los autores (Dunant) obtuvieron la micrografía electrónica en la Universidad de Ginebra.





2. HIPOTESIS VESICULAR de la liberación de acetilcolina. Se presenta en este diagrama esquemático. Casi la mitad del contenido de acetilcolina de la terminal nerviosa se almacena en las vesículas de la neurona en estado de reposo (*1*). Según esta hipótesis, al estimularse el nervio (*2*), los iones de calcio entran en la terminación y determinan que las vesículas se fundan con la membrana celular, liberándose el contenido de éstas en la hendidura sináptica. Algunas moléculas de acetilcolina se unen brevemente a los receptores de la célula postsináptica, donde evocan una respuesta característica. Seguidamente, por acción de la enzima acetilcolinesterasa, que se encuentra fuera de la terminación, se descompone, en colina y acetato, la acetilcolina liberada.

1
ENDOCITOSIS
4
2
POTENCIAL DE ACCION
3
SINTESIS DE ACETILCOLINA
EXOCITOSIS
ROTURA DE ACETILCOLINA
UNION AL RECEPTOR
PROTEINA DE MEMBRANA
CONSUMO DE ACETATO Y COLINA
PERDIDA DE ACETILCOLINA Y GANANCIA DE CALCIO
ACETILCOLINA
ACETATO
COLINA
CALCIO
RECEPTOR
ACETILCOLINESTERASA
COLINA ACETILTRANSFERASA

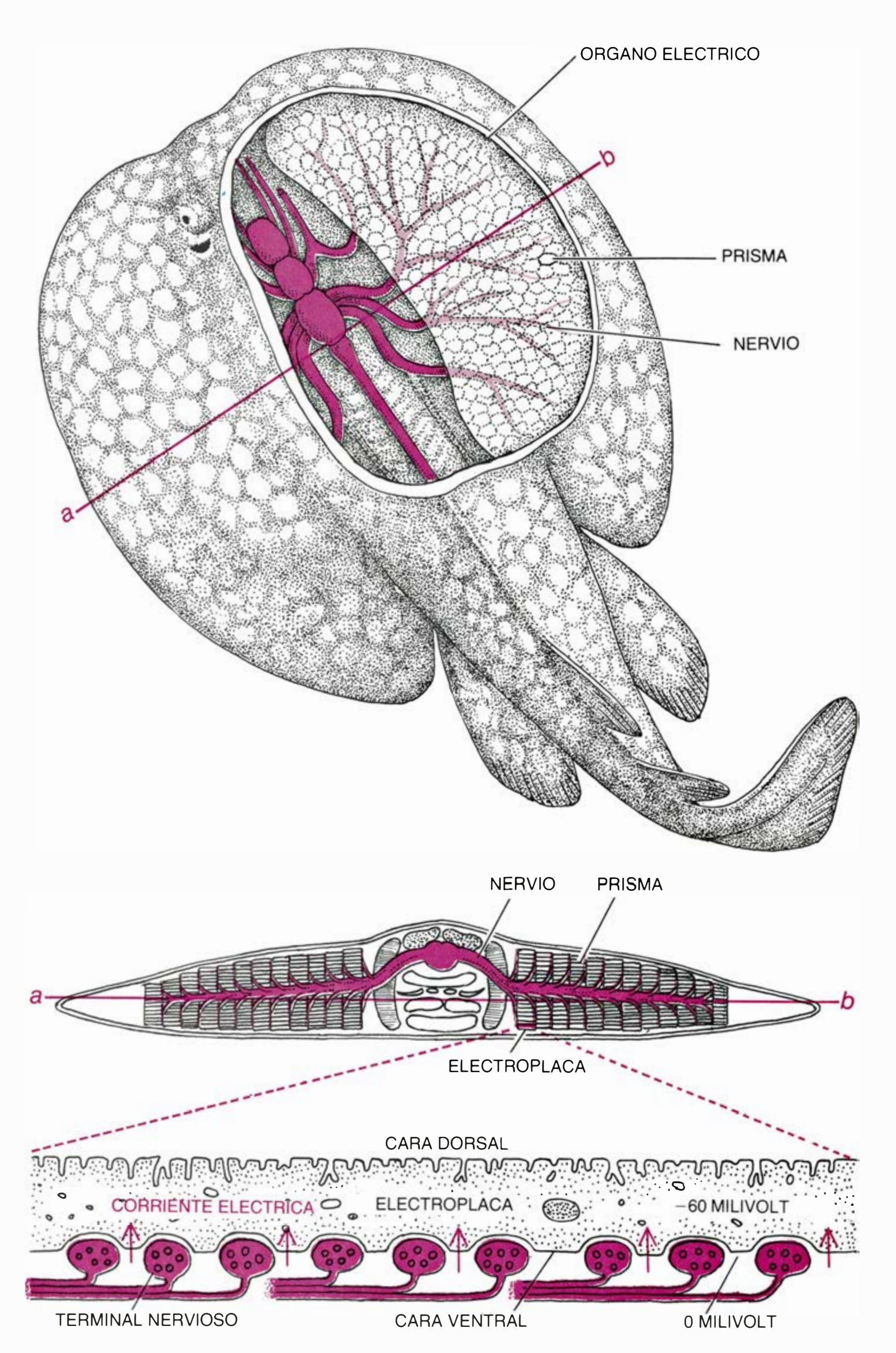
3. HIPOTESIS CITOPLASMATICA, propuesta por los autores y sus colegas para explicar el origen de la acetilcolina liberada por una neurona estimulada. Al igual que en la hipótesis vesicular, la acetilcolina se encuentra repartida inicialmente entre las vesículas y el citoplasma, o material fundamental de la célula (*1*). Un impulso nervioso provoca la entrada de calcio en la terminación (*2*). Según esta nueva hipótesis, el calcio actúa sobre proteínas específicas de la membrana celular, que forman canales para la acetilcolina. Seguidamente, la acetilcolina brota desde el citoplasma hacia la hendidura sináptica, donde sigue el mismo curso que en la hipótesis vesicular. Si se prolonga la estimulación eléctrica del nervio, la acetilcolina del interior de las vesículas comienza a escapar al citoplasma. Las vesículas pueden secuestrar, entonces, el calcio que había entrado en el citoplasma (*3*). La terminación nerviosa recobra su estado de reposo cuando el calcio de las vesículas se expulsa, quizás por exocitosis (*4*). Los iones acetato y la colina vuelven a entrar en la terminación, donde se sintetiza de nuevo acetilcolina por la acción catalítica de la enzima acetiltransferasa. Se forman nuevas vesículas y la acetilcolina de la terminación nerviosa se distribuye de forma que se restaura por completo el equilibrio entre la acetilcolina vesicular y la acetilcolina citoplasmática.

ción. La colina acetiltransferasa es la enzima que cataliza la síntesis de acetilcolina. Se transporta la enzima en el axón en sentido descendente desde el cuerpo de la neurona hasta la terminación, en cuyo citoplasma se almacena. En consecuencia, todos los elementos necesarios para la síntesis de acetilcolina quedan concentrados en el pequeño espacio de la terminación axónica. No resulta sorprendente que la concentración más alta de acetilcolina se encuentre, al parecer, en esa parte.

La idea de que las vesículas podrían ser la fuente inmediata de la acetilcolina liberada en las sinapsis data de los años cincuenta. La microscopía electrónica, de reciente aparición, permitió observar las vesículas por primera vez. Por otra parte, en 1952, Paul Fatt y Bernhard Katz, del University College de Londres, descubrieron pequeñas variaciones en la diferencia de potencial a través de la membrana de una célula muscular en reposo. Las variaciones eran inferiores al umbral necesario para estimular una contracción de la fibra muscular. Responderían, casi con seguridad, a la liberación de pequeñas cantidades de acetilcolina desde las terminaciones neuromotoras, que actuaban sobre receptores de proteínas localizados en la membrana del músculo. Las variaciones de diferencias de potencial se denominaron potenciales miniatura de placa terminal.

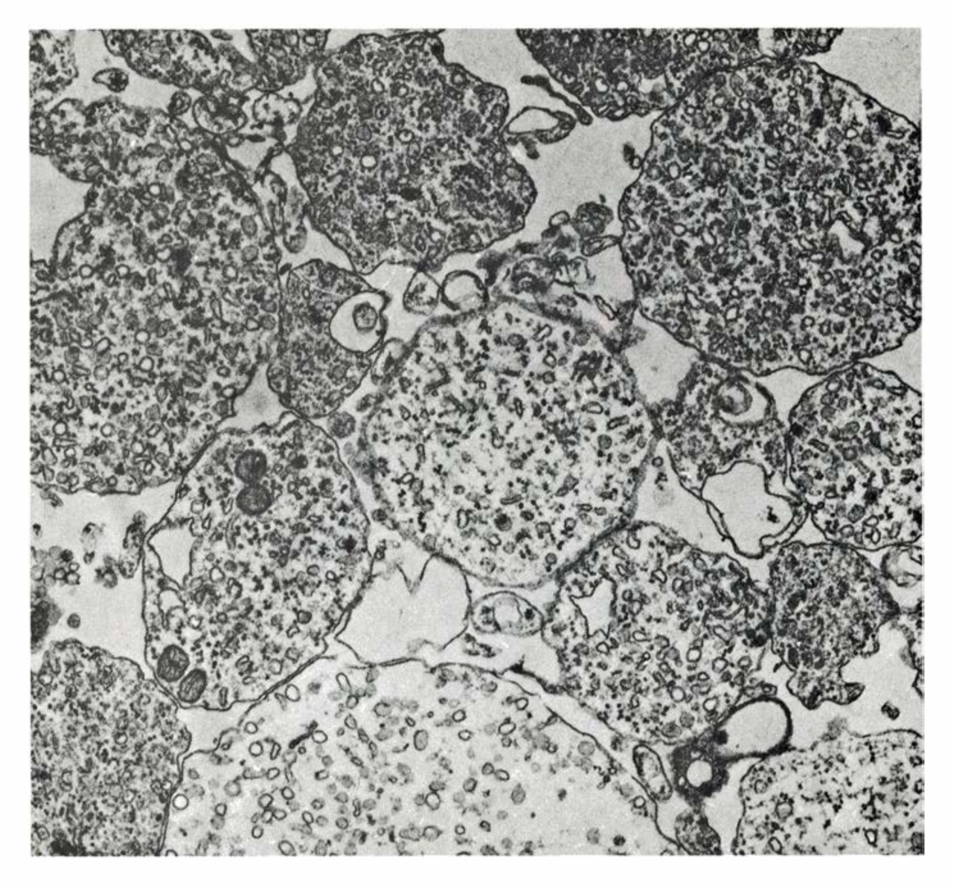
Katz y sus colegas propusieron que cada potencial miniatura de placa terminal correspondía a la liberación de acetilcolina encerrada en el interior de una vesícula sináptica. Existían varias y buenas razones para aceptar la hipótesis vesicular. En primer lugar, todos los potenciales miniatura de placa terminal parecían tener la misma magnitud y la misma curva de tiempo (cambio en la diferencia de potencial registrado en función del tiempo).

Además, aparte su pequeño valor, los potenciales miniatura de placa terminal mostraban las mismas propiedades que el potencial de placa terminal, de valor mucho más alto, producido por la estimulación total de una neurona. Los potenciales miniatura, por ejemplo, tenían la misma curva de tiempo que los potenciales mayores y se detectaban en los mismos lugares de la membrana muscular. De hecho, se cree que el potencial total de placa terminal es un múltiplo de los potenciales miniatura. En una terminación grande, la cifra puede ascender a 400, con lo que, de acuerdo con la hipótesis vesicular, otras tantas 400 vesículas contribuirían a la transmisión de un solo impulso a la fibra muscular. Finalmente, cada potencial miniatura de placa terminal se genera por la acción casi simultánea de unos cuantos miles de moléculas de acetilcolina, cantidad que, razonablemente, puede captar una sola vesícula.



4. NEUROANATOMIA DEL PEZ ELECTRICO *Torpedo marmorata*, en tres perspectivas. En la parte superior se ha eliminado la piel de la cara dorsal del órgano eléctrico del pez para mostrar parte de los prismas que constituyen el órgano. Los nervios que conducen al interior del órgano eléctrico se muestran en color. Los prismas constan de las electroplacas que se apilan, de la cara ventral del pez a la dorsal; se representan en la ilustración central, en sección vertical a lo largo de la línea de color. En la parte inferior aparece un esquema muy aumentado de las sinapsis de una electroplaca. El potencial eléctrico dentro de la electroplaca es de −60 milivolt en estado de reposo, y solamente en la cara ventral existe una gran resistencia al paso de la corriente eléctrica. Cuando las terminaciones nerviosas liberan acetilcolina, disminuye la resistencia eléctrica de la cara ventral de la electroplaca, generándose una intensa corriente eléctrica, resultado de la rápida entrada en la célula de iones de sodio cargados positivamente.

A mediados de la década de 1970, esta interpretación empezó a perder parte de su atractiva sencillez. Mahlon E. Kriebel y sus colaboradores, del Hospital Clínico Syracuse Upstate de la Universidad estatal de Nueva York, demostraron que lo que antes se había





5. SINAPTOSOMAS, o terminaciones nerviosas aisladas que liberan acetilcolina, procedentes de una preparación del órgano eléctrico del *Torpedo*; se representan en la micrografía electrónica superior. Primero, las terminaciones de los axones nerviosos se perforan, y luego se vuelven a cerrar. Los sinaptosomas resultantes retienen la capacidad de sintetizar y liberar acetilcolina. Los sinaptosomas los aislaron por primera vez, en 1976, uno de los autores (Israël), Nicolas Morel, Robert Manaranche y Paule Mastour-Frachon, en el laboratorio de Neurobiología Celular de Gif-sur-Yvette, Francia. La micrografía electrónica inferior muestra las vesículas sinápticas que aislaron a partir del órgano eléctrico por primera vez, en 1968, Israël, Jean Gautron y Bernard Lesbats, a la sazón en el Hospital de la Salpêtrière de París.

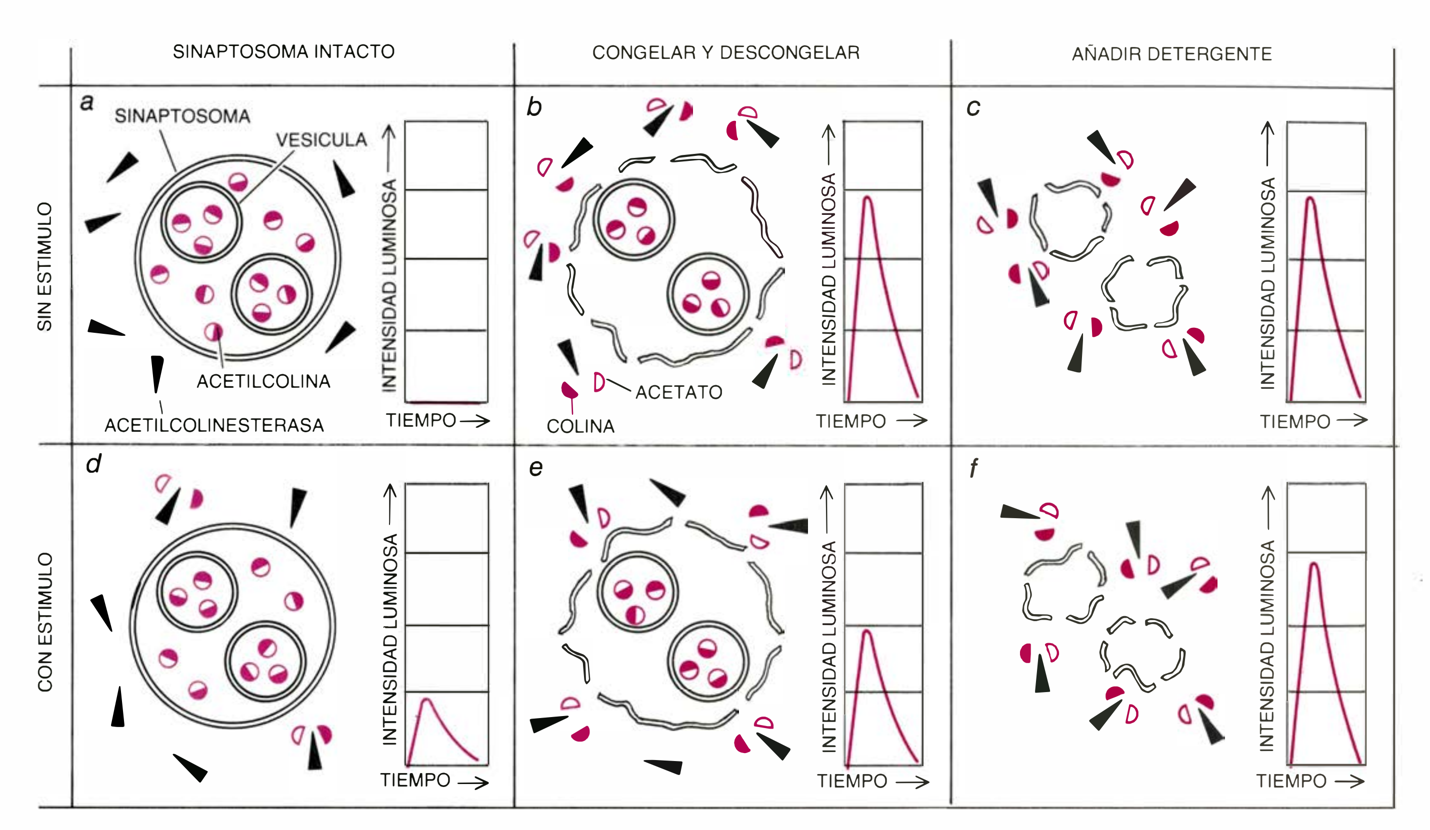
considerado potencial miniatura constaba probablemente de elementos de magnitud aún menor. Tales potenciales subminiatura de placa terminal eran, por término medio, unas diez veces menores que los potenciales miniatura, de ahí que escaparan a la resolución de las técnicas de medición disponibles. No recibió aceptación inmediata ese nuevo descubrimiento, pues planteaba la cuestión de si una vesícula era la responsable de la liberación de un cuanto de acetilcolina o de una subunidad aún más pequeña.

Para responder a ella hubo que diseñar métodos que permitieran analizar más directamente el nivel de acetilcolina y su recambio en el interior de la terminación nerviosa. Los métodos electrofisiológicos sólo registran lo que ocurre en la membrana postsináptica. La actividad de la terminación axónica transmisora se observa, por tanto, indirectamente, a través de los efectos de la acetilcolina que libera.

Entre 1959 y 1964, Victor P. Whittaker, de la Universidad de Cambridge, y Eduardo de Robertis, de la Universidad de Buenos Aires, junto con sus colaboradores, dieron los primeros pasos en el análisis directo de las terminaciones. Lograron mostrar que, cuando se homogeniza tejido cerebral de roedores, las terminaciones nerviosas se perforan levemente y se vuelven a cerrar. Seguidamente, las terminaciones perforadas se pueden separar, por centrifugación, de los otros fragmentos del tejido en forma de un material pesado, cuya densidad aumenta con la distancia del centro de la centrífuga. Las terminaciones nerviosas extraídas de la centrifugación se recuperan en una solución de densidad característica y se llaman sinaptosomas. Cabe, así, manipular y analizar, separadamente del resto del cerebro, una porción esencial de la neurona.

Independientemente, Whittaker y De Robertis avanzaron un paso más al advertir la posibilidad de recuperar la membrana externa del sinaptosoma y de aislar sus vesículas internas. Encontraron que, efectivamente, las vesículas contenían acetilcolina, ¡como era de esperar! También encontraron, sin embargo, que no toda la acetilcolina estaba encerrada en las vesículas. Parte de ese compuesto procedía, aparentemente, del citoplasma de la neurona. Roger M. Marchbanks, de la Universidad de Cambridge, sugirió, entonces, que también la acetilcolina citoplásmica desempeñaba un importante papel funcional en la neurotransmisión.

Para avanzar en el estudio de la ace-



6. ENSAYO DE QUIMIOLUMINISCENCIA que permite seguir continuamente la liberación de acetilcolina en una suspensión de sinaptosomas (*a*). Los sinaptosomas se mezclan con las enzimas acetilcolinesterasa, colina oxidasa y peroxidasa de rábano y con la sustancia luminiscente luminol. Cuando la acetilcolina de los sinaptosomas entra en contacto con esa mezcla, se convierte en colina; se oxida entonces la colina y un subproducto de la reacción desencadena el proceso de luminiscencia. Si el sinaptosoma se congela primero y a continuación se descongela, se destruye su membrana externa, quedando intactas las membranas de las vesículas. La acetilcolina extravesicular se escapa del sinaptosoma produciendo una emisión lumínica (*b*). Seguidamente, las membranas vesiculares se destruyen con un detergente, liberándose la acetilcolina vesicular, lo que origina una segunda emisión de luz (*c*). Si se repite el experimento después de haber estimulado los sinaptosomas, se libera acetilcolina, provocándose emisión de luz (*d*). La reserva citoplasmática de acetilcolina (*e*) se reduce entonces en la cantidad de acetilcolina liberada durante la estimulación. La acetilcolina vesicular, por su parte, se mantiene inalterada (*f*).

tilcolina y del mecanismo de su descarga se imponía encontrar un tejido más conveniente que el cerebro de roedor, pues sólo una pequeña porción de sus terminaciones nerviosas son colinérgicas. En principio, la unión entre las células nerviosas y musculares de animales vertebrados podía suministrar un material más homogéneo, ya que las células neuromotoras son colinérgicas. Las terminaciones nerviosas de estas uniones, sin embargo, son muy pequeñas, comparadas con la masa de las fibras musculares.

El pez eléctrico de agua salada *Torpedo* constituye un material experimental ideal para los estudios de la transmisión sináptica de la acetilcolina. Este pez, que vive en aguas costeras poco profundas, posee un par de órganos especializados, denominados órganos eléctricos, que generan breves descargas de corriente, con las que se defiende de, y paraliza a, sus presas.

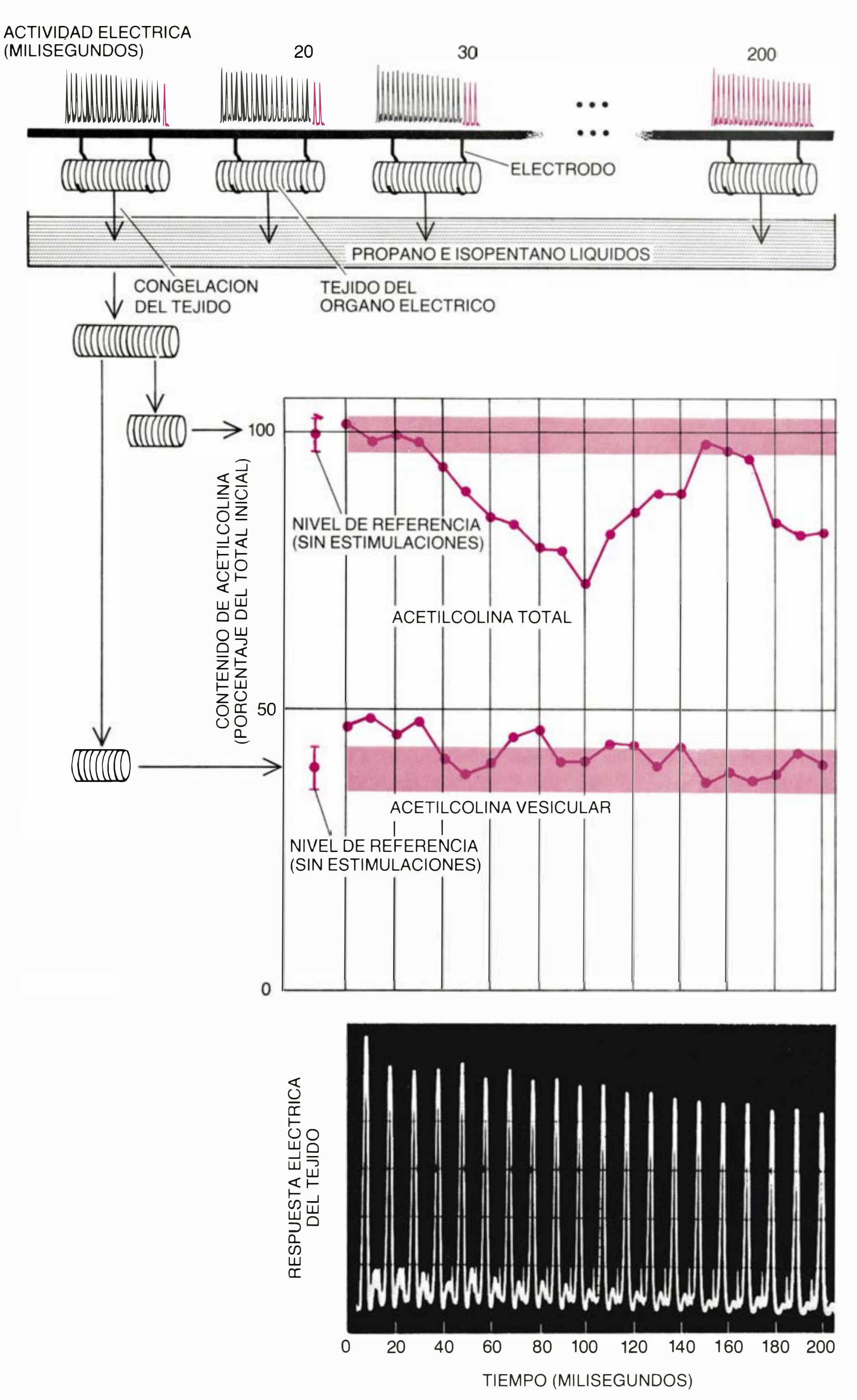
El órgano eléctrico es muy adecuado para los experimentos con acetilcolina, al constar de un gran número de sinapsis. En 1940, Alfred Fessard, Wilhelm Feldberg y David Nachmansohn, en la Estación de Biología Marina de Arcachon, Francia, descubrieron que estas sinapsis eran colinérgicas. En realidad, el órgano eléctrico es un sistema neuromuscular transformado, en el que el mecanismo de transmisión de un estímulo nervioso es muy similar al mecanismo de un sistema ordinario. Así, los potenciales miniatura y subminiatura de placa terminal también se registran en el órgano eléctrico. Sin embargo, la preparación experimental obtenida a partir del órgano eléctrico no presenta la complicada estructura contráctil de la célula muscular, ni el complejo sistema de circuitos de una neurona, ni el conjunto heterogéneo de neurotransmisores del sistema nervioso central.

Un espécimen típico de *Torpedo marmorata*, la especie europea del pez, mide unos 40 centímetros y pesa unos 1500 gramos. Los dos órganos eléctricos están situados en unas "alas" planas, a derecha e izquierda del cuerpo del pez, y suponen una quinta parte del peso del mismo. Cada órgano consta de unos 400 prismas, cuyos ejes van desde la superficie dorsal hasta la ventral.

Un prisma es un apilamiento de células planas delgadas llamadas electroplacas, que generan la corriente eléctrica. La electroplaca presenta una resistencia eléctrica alta en su membrana ventral y, una resistencia baja, en su membrana dorsal. Las sinapsis se encuentran sólo a lo largo de la parte ventral de la célula. Calculamos que existen más de 500.000 millones de terminaciones en cada órgano eléctrico.

Todas las terminaciones emiten simultáneamente acetilcolina, la cual actúa sobre moléculas receptoras de las electroplacas abriendo canales en la membrana sólo por la parte ventral de la célula (es decir, por la parte de la resistencia eléctrica alta). La apertura de los canales permite la entrada rápida de cationes sódicos a través de las membranas ventrales, produciendo el movimiento de estos iones una corriente eléctrica. El efecto resultante es como el de la descarga repentina de un numeroso conjunto de pequeñas baterías conectadas en serie. Una corriente eléctrica de considerable magnitud se propaga por el agua de mar circundante, ya que el campo eléctrico impulsa los iones procedentes de las sales disueltas en el agua. En un pez *Torpedo* de tamaño medio, la corriente producida por los dos órganos eléctricos puede ser de más de siete ampère.

Jean Gautron, Bernard Lesbats y uno de los autores (Israël) aislaron por primera vez en 1968 vesículas del órgano eléctrico de *Torpedo* en el Hospital



7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL que permite determinar la variación de acetilcolina liberada por las terminales nerviosas intactas en cortos intervalos de tiempo. Mediante trenes de impulsos eléctricos de breve duración se estimulan fragmentos de tejido del órgano eléctrico de *Torpedo* durante intervalos de tiempo variable (*estímulos en color*). La transmisión de acetilcolina a que dio lugar el estímulo se detiene entonces bruscamente en varios estadios del proceso al sumergir todos los tejidos en un baño con un líquido muy frío (*arriba*). Toda la acetilcolina liberada de las terminales nerviosas se destruye por la acción de la acetilcolinesterasa. Cada fragmento de tejido se divide entonces en dos partes. En una se mide la acetilcolina total; en la otra se mide solamente la acetilcolina vesicular. En ambos casos los métodos de medida son similares a los utilizados para determinar la cantidad de acetilcolina en los distintos compartimentos de un sinaptosoma [*véase la figura 6*]. Los dibujos centrales muestran que la acetilcolina total de la terminal nerviosa se reduce durante las estimulaciones, mientras que la acetilcolina vesicular permanece prácticamente constante. Por lo tanto, la acetilcolina liberada debe proceder de alguna fuente extravesicular que, se supone, es el citoplasma. La respuesta eléctrica medida para el tejido frente a la estimulación es del todo similar a la actividad eléctrica en los órganos eléctricos del pez vivo (*abajo*).

de la Salpêtrière, de París. Entre 1976 y 1977, Israël colaboró también con Nicolas Morel, Robert Manaranche y Paule Mastour-Frachon, en el Laboratorio de Neurobiología Celular de Gif-sur-Yvette, Francia, en los trabajos que permitieron aislar sinaptosomas a partir del órgano eléctrico. Los métodos de preparación de las vesículas sinápticas fueron muy semejantes a los que se habían utilizado con éxito con tejido cerebral. Sin embargo, debido a la homogeneidad del tejido de partida, las vesículas que se obtuvieron del órgano eléctrico contenían 1000 veces más acetilcolina que las vesículas procedentes del tejido cerebral.

Uno de los primeros objetivos de nuestro grupo fue comparar la cantidad de acetilcolina de las vesículas con la cantidad de acetilcolina de toda la terminal nerviosa. Al tratar una terminación nerviosa con un ácido que inactiva las enzimas, tanto la membrana externa de la terminación nerviosa como las membranas internas de las vesículas se rompen. El tratamiento también destruye la acetilcolinesterasa externa a la terminación, pero no afecta a la acetilcolina. De esta forma, ninguna molécula de acetilcolina contenida en la terminación nerviosa resulta afectada por el tratamiento, y se puede medir.

Por otra parte, si se congela rápidamente la terminación nerviosa y posteriormente se descongela, o si se rompe mecánicamente de cualquier otra forma, sólo se abre la membrana externa de la terminación. No se inhibe la actividad acetilcolinesterasa y, en consecuencia, la enzima hidroliza la acetilcolina del citoplasma fuera de las vesículas. Sin embargo, la acetilcolina vesicular permanece intacta, ya que la membrana de la vesícula la protege de la acción de la acetilcolinesterasa. Esta acetilcolina se puede medir después de liberarla con un ácido que destruye la acetilcolinesterasa y rompe las membranas de las vesículas.

En 1968 corroboramos el descubrimiento de que las vesículas sinápticas almacenan gran cantidad de acetilcolina. Encontramos que las vesículas del órgano eléctrico retienen, al igual que las vesículas del cerebro, casi la mitad de la acetilcolina de toda la terminación nerviosa. Estos dos resultados, en conjunto, parecían apoyar fuertemente la hipótesis vesicular. Sin embargo, es importante recordar que el equilibrio de acetilcolina probablemente fluctúe libremente en el citoplasma de la terminación. La existencia de acetilcolina citoplásmica no debe sorprender, pues la




8. PARTICULAS del interior de la membrana de una terminación nerviosa del órgano eléctrico antes de la estimulación del nervio (*micrografía electrónica de la izquierda*) y después de aplicar un estímulo durante tres milisegundos (*micrografía electrónica de la derecha*). Se aprecia que la densidad de las partículas aumenta espectacularmente durante la transmisión de un impulso nervioso. Al cabo de unos cuantos milisegundos se vuelve a la densidad del estado de reposo. El cambio refleja posiblemente la actuación del mecanismo que libera acetilcolina. Las micrografías fueron realizadas por Dominique Müller, García-Segura, Arpad Parducz y uno de los autores (Dunant) en la Universidad de Ginebra. El aumento de las imágenes es de 125.000 diámetros.

enzima responsable de la síntesis de la acetilcolina, la colina acetiltransferasa, también se encuentra en el citoplasma.

En este punto de nuestras investigaciones, parecía claro que podíamos reforzar aún más la hipótesis vesicular. Si la hipótesis era correcta, al estimularse una terminación nerviosa debería liberarse acetilcolina de las vesículas antes que de cualquier otra parte de la célula. Podíamos verificar esta predicción en la masa concentrada de terminaciones nerviosas colinérgicas presentes en el órgano eléctrico del *Torpedo*.

En 1970 comenzamos las experiencias estimulando los nervios aferentes del órgano hasta que se observó el agotamiento de la respuesta eléctrica; estábamos entonces convencidos de que ese tratamiento produciría una disminución acentuada del número de vesículas, así como del contenido en acetilcolina de las mismas. Sorprendentemente, resultó que fue la acetilcolina extravesicular la que se agotó primero, renovándose luego durante la estimulación. Por el contrario, el número de vesículas y su contenido en acetilcolina permanecieron constantes varios minutos, y sólo después comenzó a agotarse la acetilcolina de las vesículas.

Para someter a prueba el descubrimiento, los autores y sus colaboradores desarrollaron varias técnicas experimentales especializadas. Por ejemplo, uno de nosotros (Israël) y Lesbats desarrollaron un nuevo ensayo químico para medir los cambios de nivel de la acetilcolina en diferentes compartimentos de los sinaptosomas a intervalos breves de tiempo. Se añadió una mezcla de las enzimas acetilcolinesterasa, colina oxidasa y peroxidasa de rábano y la sustancia luminiscente luminol a la solución que contenía los sinaptosomas. Al liberarse acetilcolina al medio, una cadena de reacciones químicas generaba una emisión de luz proporcional a la cantidad de acetilcolina presente. Aplicamos ese ensayo al estudio de la acetilcolina liberada por los sinaptosomas del *Torpedo*.

Los sinaptosomas se estimulan eléctricamente con dificultad, por lo que hubo que acudir a otras técnicas experimentales. Así, si se añaden a la solución ciertas moléculas peptídicas denominadas ionóforos, éstas forman en la membrana sinaptosómica canales artificiales que permiten el paso a su través de ciertos iones. Uno de estos ionóforos facilita el paso de iones cálcicos, los cuales, a su vez, producen la liberación de acetilcolina. La acetilcolina liberada puede entonces estimarse mediante el ensayo quimioluminiscente.

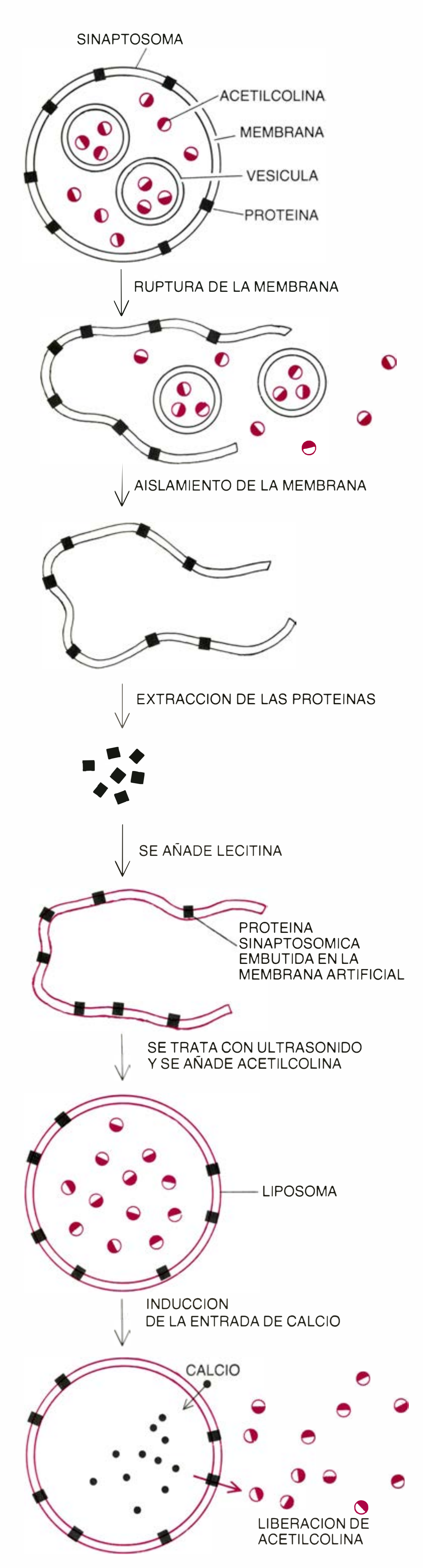
Nuestros resultados con los sinaptosomas concuerdan con los primeros resultados obtenidos con tejido intacto: lo primero que se libera es la acetilcolina del citoplasma. La estimulación por calcio, efectivamente, determina la liberación de la acetilcolina, incluso en el caso de sinaptosomas a los que se les ha eliminado la mayor parte de sus vesículas y luego se han rellenado con acetilcolina preparada comercialmente. La acetilcolina vesicular no parece ser imprescindible para que se produzca la liberación.

Con objeto de realizar mediciones bioquímicas rápidas en tejidos intactos durante la liberación de acetilcolina, hemos construido en la Universidad de Ginebra un aparato que puede estimular, de forma secuencial y rápida, varios prismas aislados del órgano eléctrico [*véase la figura 7*]. Así, los prismas alcanzan simultáneamente diversos grados de liberación de acetilcolina, y la liberación se detiene abruptamente cuando los prismas se sumergen en un líquido frío.

En una serie de experimentos, el estímulo consistió en la aplicación de breves trenes de impulsos cada 10 milisegundos, a lo largo de un período de 200 milisegundos. Escogimos este sistema de estímulos por ser semejante a la descarga natural de un *Torpedo* en su ambiente marino. De nuevo (esta vez con menor sorpresa) comprobamos que la acetilcolina de las vesículas sinápticas parecía no cambiar con el estímulo.

Además, encontramos que el nivel extravesicular disminuía durante los primeros 100 milisegundos, aumentaba durante los 100 milisegundos siguientes y luego volvía a disminuir. La formación de acetilcolina en las terminaciones nerviosas intactas era, evidentemente, un proceso muy rápido. Finalmente, el nivel de acetilcolina disminuía, al parecer porque las terminaciones no podían sintetizar suficiente cantidad de acetilcolina para suplir el gran volumen liberado.

Resulta difícil pensar que la acetilcolina pueda atravesar la membrana de la neurona eferente a alta velocidad sin producir ningún cambio estructural visible, aunque sea transitorio. Si las vesículas sinápticas participan de forma inmediata en el proceso de liberación de la acetilcolina, se podrían observar aberturas en la membrana siempre que se produjese una fusión de dichas vesí-



culas. Estas aberturas deberían también observarse durante la liberación de acetilcolina de la neurona.

Se han obtenido varias micrografías electrónicas que muestran la fusión de una vesícula con la membrana de la terminación nerviosa en una sinapsis neuromuscular. Las vesículas, sin embargo, no se han encontrado en todas las condiciones en las que se producía liberación de acetilcolina. También hemos obtenido algunas micrografías electrónicas en las que se observa exocitosis de vesículas en las terminaciones nerviosas del órgano eléctrico. Sin embargo, la fusión de las vesículas en nuestros experimentos no va acompañada siempre de la liberación de acetilcolina y, cuando esto ocurre, tiene lugar, al parecer, poco después de la liberación.

Dado que la fusión de las vesículas no está asociada de forma fiable con la liberación de acetilcolina, nos hemos interesado vivamente en otro cambio estructural, simultáneo a la liberación de acetilcolina, en la membrana de una terminación nerviosa. Cuando la membrana se congela rápidamente se puede desdoblar exponiendo su cara interna o externa; a gran aumento se advierten, en las superficies internas de las caras, partículas de cinco a 20 nanómetros de diámetro.

Siempre que los sinaptosomas liberaban acetilcolina, encontramos que disminuía el número de partículas de entre cinco y 11 nanómetros de diámetro, mientras que aumentaba el número de partículas de entre ocho y 20 nanómetros. En los prismas intactos, no pudimos detectar ningún cambio en el número de las partículas internas de la membrana más pequeña, aunque aumentó significativamente el número de las partículas mayores. El tiempo de aparición de las partículas correspondió exactamente a la variación a lo largo del tiempo de la liberación de acetilcolina medida mediante la respuesta eléctrica.

Estas observaciones, consideradas conjuntamente, sugieren que el mecanismo responsable de la descarga de acetilcolina está presente, de alguna forma, en la membrana de las terminaciones nerviosas transmisoras. El mecanismo consiste probablemente en un cambio de la configuración de las proteínas alojadas en la membrana, y quizá los efectos del cambio se hagan patentes en forma de un aumento transitorio del número de partículas grandes de la membrana.

9. PROTEINAS de alto peso molecular, aisladas recientemente a partir de las membranas de las terminaciones nerviosas, se han introducido en pequeñas vesículas llamadas liposomas, según se muestra en el esquema. Los liposomas se forman a partir de membranas artificiales, de lecitina comercial, tratadas con ultrasonidos. Los liposomas se llenan de acetilcolina y, cuando el calcio penetra en su interior, liberan acetilcolina, de la misma forma que un terminal nervioso ordinario. Los resultados experimentales indican que el mecanismo de liberación de acetilcolina está ligado a la membrana de la terminación. Dibujos de B. Tagawa.

Si esta hipótesis es correcta, cabría extraer la proteína de las membranas de la terminación nativa y, posteriormente, insertarla en membranas artificiales. Entonces, éstas deberían ser capaces de liberar acetilcolina al exponerlas a la acción desencadenante de iones cálcicos.

Recientemente, hemos intentado este tipo de experimento en el laboratorio de uno de los autores, con resultados preliminares aparentemente satisfactorios. Los sinaptosomas de *Torpedo* se abrieron, eliminándose de las membranas las vesículas sinápticas y demás componentes del citoplasma. Las membranas se criodesecaron y sus componentes se incorporaron a membranas artificiales hechas con lecitina comercial.

Las membranas artificiales forman pequeñas bolsas cerradas cuando se tratan con ultrasonidos; se asemejan a las membranas de los sinaptosomas originales de *Torpedo*, aunque las bolsas que se forman a partir de las membranas artificiales no retienen ningún orgánulo interno, del tipo de las vesículas sinápticas. Cuando se llenan de acetilcolina y se introduce calcio, la acetilcolina se libera a la solución externa. En las membranas artificiales se aprecian las partículas grandes de la membrana durante la descarga de acetilcolina estimulada artificialmente.

¿Cuál es la función de las vesículas, si el mecanismo de liberación de acetilcolina se localiza en la membrana de la terminación nerviosa y se emite acetilcolina citoplasmática? Una función, de reserva, consistiría en almacenar la acetilcolina que pudiera requerirse, tras una intensa actividad nerviosa, para compensar las pérdidas sufridas por las reservas del citoplasma.

Las vesículas sinápticas poseen otra importante propiedad, descubierta en el laboratorio de uno de los autores. Pueden acumular calcio y, de esa forma, ayudar a culminar el proceso de liberación de acetilcolina. Tras una estimulación prolongada del nervio, la acetilcolina comienza a escaparse de las vesículas, llenándose entonces éstas de calcio. Cabe imaginar que, para eliminar el calcio de la célula, las vesículas se fusionan unas tras otras con la membrana sináptica y expulsan sus contenidos

por exocitosis. Esta cadena de fenómenos se ha demostrado, hasta ahora, sólo parcialmente, aunque probablemente quepa asegurar que las vesículas desempeñan un papel esencial en la regulación de los niveles de acetilcolina y calcio en el centro de la sinapsis.

Queda una cuestión final, que un mecanismo de liberación de esta clase podría resolver: ¿cómo se explican los potenciales miniatura y subminiatura de placa terminal? Imagínese que la proteína de la membrana es un polímero, es decir, una molécula constituida por elementos que pueden ensamblarse o disgregarse. Cuando la neurona está en reposo, los elementos están disociados en la membrana, y en este estado son demasiado pequeños para observarlos como partículas en las micrografías. Sin embargo, cuando el calcio penetra en la terminal, induce la formación de un polímero que puede aparecer transitoriamente como una partícula interna grande de la membrana.

El proceso puede estar asociado con la liberación de un conjunto de moléculas de acetilcolina procedentes de la reserva del citoplasma. La partícula liberadora actuaría a modo de canal específico para la acetilcolina. El canal se abriría, breves instantes, permitiendo la descarga de cierta cantidad de acetilcolina. Esa cantidad podría consistir, por ejemplo, en unos cuantos cientos de moléculas que, supuestamente, generarían la subunidad correspondiente a un potencial subminiatura de placa terminal. La formación sincronizada de un cierto número de polímeros liberadores en una región dada de la sinapsis sería entonces la responsable de un potencial miniatura, y el mismo proceso sincronizado en todas las ramas terminales de las fibras nerviosas aferentes podría dar lugar a un impulso nervioso completo.

Por supuesto, cabe imaginar otros modelos. El problema sólo podrá resolverse, probablemente, comparando las propiedades del mecanismo de liberación en dos condiciones. Primero, el mecanismo debe separarse y estudiarse *in vitro* en condiciones que permitan su manipulación y funcionamiento en membranas artificiales. Segundo, debe estudiarse en la membrana de una neurona transmisora intacta, donde el proceso pueda darse de la manera más natural posible. Resulta en especial atractivo que precisamente ahora esté a nuestro alcance un conocimiento más profundo de lo que ocurre en las membranas de las terminaciones nerviosas durante los breves instantes en que están activadas.

Ciencia y sociedad

Pigmentos y radiaciones

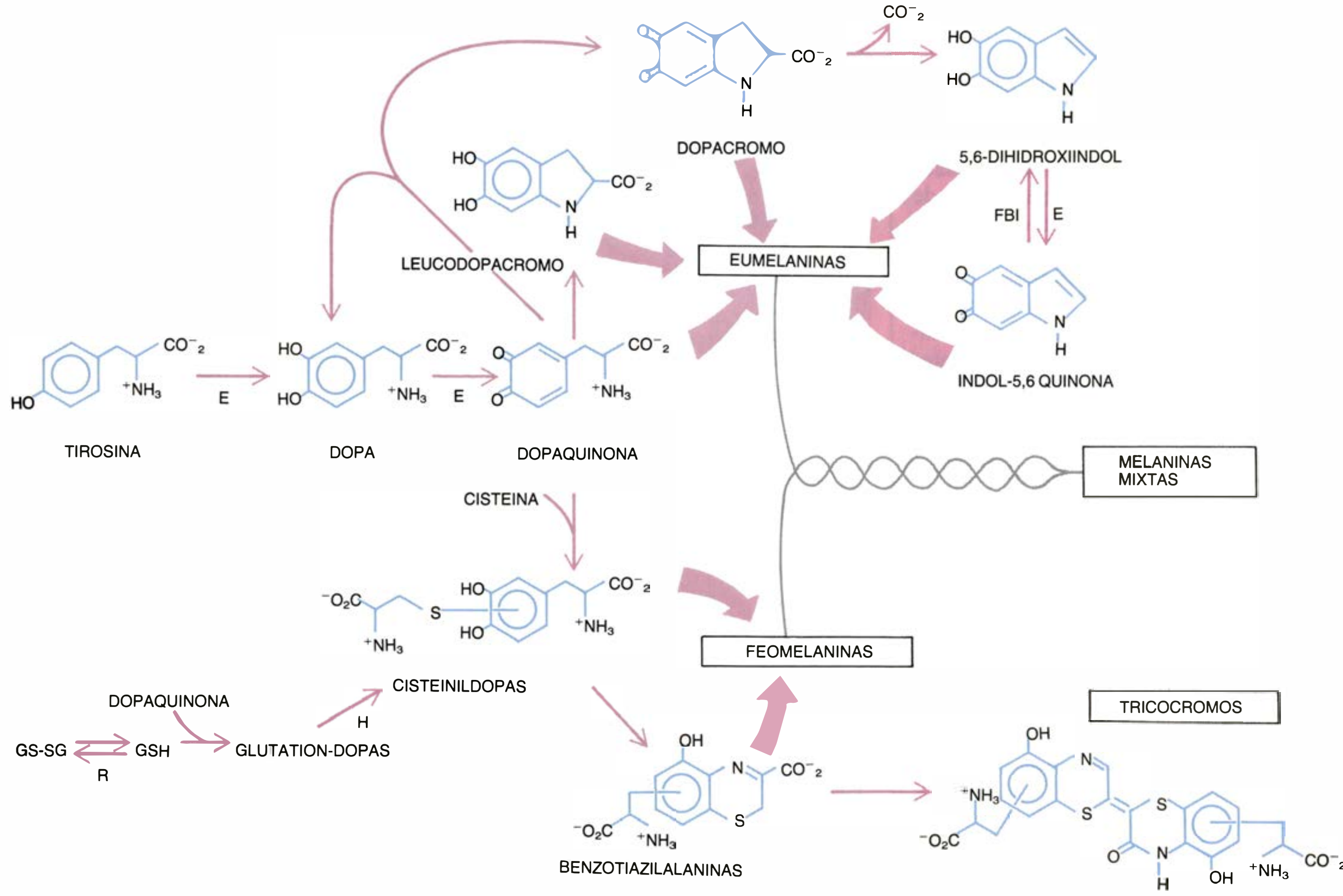
La Facultad de Medicina de la Universidad de Murcia va a celebrar en septiembre un seminario sobre melanización de las células pigmentadas, una de las facetas menos conocidas y más importantes de nuestro organismo. La pigmentación es un proceso extensamente difundido en todos los seres vivos. Su función se asocia a una amplia gama de fenómenos: en bacterias, para la formación de ácidos húmicos en suelos; en plantas, con misiones de defensa contra ataques de insectos y microorganismos o con un papel biosintético en la formación de tropolonas y ligninas; en insectos, con la existencia de una cutícula protectora. Y muchísimas más: atracción sexual, camuflaje, ventajas evolutivas, así como protección contra agentes redox. En el hombre la acción filtrante de las melaninas protege contra la radiación solar, en especial la ultravioleta. En los habitantes del hemisferio norte existe una relación directa entre la radiación ultravioleta recibida anualmente y la incidencia de cáncer.

La unidad bioquímica de los seres vivos se hace evidente de un modo especial en el sistema pigmentario, con la existencia generalizada de un complejo enzimático, denominado fenolasa en plantas y tirosinasa en seres superiores, que actúa usando oxígeno atmosférico, hidroxilando monofenoles (actividad cresolasa) y oxidando ortodifenoles (actividad catecolasa) hasta intermedios quinónicos coloreados que sufren posteriormente diversas transformaciones, condensaciones y asociaciones con otro tipo de moléculas tales como proteínas, hasta dar lugar a la forma pigmentada final, las melaninas.

En los mamíferos, la presencia de los pigmentos de melanina (tricocromos, feomelaninas y eumelaninas, según su naturaleza química y color) conduce principalmente a su pigmentación visible que notoriamente se manifiesta en el color del pelo y de la piel. Las melaninas se producen en orgánulos especializados, los melanosomas, que forman parte de unas células secretoras muy singulares, los melanocitos, de origen neuroectodérmico, de aspecto muy ramificado y que se localizan especialmente en los bulbos capilares, en la unión epidérmica y en la región uveal de los ojos.

Los melanocitos actúan como "factorías" de melaninas, pero son otras células, las denominadas queratinocitos, las responsables de la distribución del pigmento y de la degradación final de los melanosomas. En la epidermis existe una unidad funcional y estructural de pigmentación, la unidad melánica epidérmica, constituida por asociaciones específicas de melanocitos con queratinocitos.

El proceso de melanización puede considerarse como una cascada de acontecimientos que deben estar significativamente marcados por controles reguladores internos, entre los cuales se pueden destacar los de naturaleza enzimática, hormonal y genética, lo que explica que puedan existir un gran número de anormalidades descritas, entre las cuales hay numerosas deficiencias pigmentarias (albinismo, vitiligo, etc.), siendo especialmente destacable la anormalidad pigmentaria asociada al desarrollo de los melanomas malignos que son causa aproximada del 1 por ciento de muertes ocasionadas



Bioquímica de la melanización

por todos los tipos de cáncer y cuya incidencia se ha duplicado en muchos países, durante los últimos años, al incrementarse un género de vida realizado más al aire libre, ya que existe una relación directa entre la radiación ultravioleta recibida y el posible desarrollo de la lesión cancerosa. En los individuos de piel oscura, los melanomas malignos se presentan raramente debido a la acción protectora de su capa melanínica. Como las eumelaninas son más eficaces que las feomelaninas en su función de apantallamiento, por absorber fuertemente en la región ultravioleta, los pelirrojos toleran mal la intensa exposición a la luz solar, en cuyo caso es mayor su peligro potencial de desarrollo de melanomas malignos. (J. A. Lozano.)

Homo habilis

Uno de los problemas más sugestivos para la paleoantropología consiste en el establecimiento morfológico y temporal de los inicios del género *Homo*, así como en la determinación de sus relaciones evolutivas con las especies de *Australopithecus*.

Comúnmente se acepta que ciertos cráneos virtualmente intactos, huesos del esqueleto postcraneal y dientes aislados responden a un patrón morfológico y cultural característico, referido por L. S. B. Leakey, P. V. Tobias y J. R. Napier (1964) como *Homo habilis*. Sin embargo, la posición taxonómica y el está, por el momento, completamente determinado.

Los restos atribuidos a *Homo habilis* proceden de las localidades sudafricanas de Swartkrans y Sterkfontein, así como de varios yacimientos enclavados al este de Africa: Olduvai, Omo y Koobi Fora. También en los niveles Djetis de la formación Putjangan de Java se han encontrado fósiles de *Homo habilis*, referidos por Von Koenigswald a *Homo modjokertensis*. Todos los fósiles de estos *Homo* tempranos han sido datados entre 2,2 y 1,6 millones de años.

La historia de *Homo habilis* se remonta a 1960 y 1961, cuando Louis Leakey descubre en la garganta de Olduvai restos craneales y mandibulares de un espécimen técnicamente denominado OH 7. Pronto aparece un cráneo parcial con la dentición superior e inferior completa, que sería llamado "Cinderella" por los Leakey, y un tercer espécimen: OH 16, familiarmente conocido por "Olduvai George". En 1968 viene a la luz OH 24, un cráneo aplastado perteneciente a una mujer, "Twiggi". Para la interpretación de este material fue decisivo el hallazgo de un cráneo bastante completo –KNM-ER 1470–, considerado el arquetipo de la especie en Africa oriental.

KNM-ER 1470 procede del miembro inferior de la formación Koobi Fora, a 37 metros bajo la toba KBS. Ha sido datado en 1,8 millones de años. De un horizonte superior es KNM-ER 1813, un cráneo de 1,7 millones de años, sobre el que se disputa su inclusión en la especie *Australopithecus africanus*.

Entre los tempranos *Homo* se encuentran otros especímenes de Africa oriental y, para ciertos autores, los homínidos de Laetoli y parte de los que aparecen en la población etíope de Hadar. No obstante, algunos antropólogos prefieren incluir la muestra de Laetoli y Hadar en la especie *Australopithecus afarensis*, aunque Tobias sólo los reconoce como subespecies adicionales de *A. africanus*.

También vivió *Homo habilis* al sur de Africa. En Sterkfontein, por ejemplo, se encontró un fósil con la cara, frente y huesos fragmentarios del cráneo.

Con base en el referido material óseo se han establecido complejas relaciones evolutivas entre *A. afarensis, A. africanus, Homo habilis* y las restantes formas robustas de australopitecinos: *A. robustus/boisei*. *Homo habilis* se distingue de las demás especies de *Australopithecus* por su expansión cerebral mayor, reducción del tamaño de los dientes y un desgaste helicoidal de los mismos. También posee abierta la mandíbula en la región delantera; sus fémures se adecúan al modelo de *Homo sapiens*: grandes cabezas y cortos cuellos. Además, ciertas semejanzas dentales y mandibulares de *Homo habilis* con *A. africanus* y *A. robustus/boisei*, no presentes en *A. afarensis*, sugieren la posibilidad de que hace entre 2,5 y 2 millones de años la especie *A. africanus* hubiera evolucionado hacia los australopitecinos robustos, por una parte, y hacia el género *Homo* por otra. De haber sucedido este proceso, tendría que admitirse que la moderada megadontia de *A. afarensis* aumentó en *A. africanus* para luego volver a reducirse en *Homo habilis*. Sin embargo, el modelo alternativo de D. C. Johanson y T. White sugiere una evolución desde *A. afarensis* hacia la megadontia en el linaje de los australopitecinos (*A. africanus, A. robustus/boisei*), y otra hacia la reducción de las proporciones dentales en el género *Homo*. Esto habría sucedido hace unos 2,5 o 3 millones de años.

Distinta consideración otorgan R. Leakey y C. E. Oxnard a los *Australopithecus* en la génesis de la humanidad. Ambos lo refieren como un linaje próximo y contemporáneo al de *Homo*, relacionado con él por haber evolucionado desde un antepasado común.

La aparición de *Homo habilis* en el registro fósil coincide casi exactamente con la presencia de herramientas toscamente talladas en piedra: núcleos y láminas cortantes de varios centímetros de longitud (industria Oldowaiense). Entre los útiles más antiguos se encuentran los procedentes de la región Gona (Hadar), que pueden remontarse a 2 millones de años; de fechas semejantes son los extraídos en los miembros E y F de la formación Shungura y en el V de Sterkfontein. La primitiva industria posiblemente afectaría a la preparación preoral del alimento, lo que pudo conducir a la reducción del tamaño dental, rasgo distintivo del género *Homo* mantenido a lo largo del tiempo. También se ha sugerido que las herramientas condicionarían definitivamente el nacimiento de la humanidad, idea de raigambre darwinista contenida en la obra *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*. Sin embargo, los procesos culturales que aparecen ligados a formas más evolucionadas, como *H. erectus* por ejemplo, sugieren modelos explicativos más complejos.

Homo habilis obtendría la mayor parte de la dieta alimenticia con la recolección de alimentos. De su actividad cazadora todo parece indicar que principalmente era un carroñero que sabía aprovechar los cadáveres abandonados o pugnaba contra otros depredadores para obtenerlos. Poco antes de la aparición de *Homo habilis*, Africa albergaba carnívoros de caninos prominentes: *Homoterium, Megantereon* y un verdadero felino: *Dinofelis*. También las hienas hicieron acto de presencia. Cuando camina sobre la Tierra *Homo habilis*, entran en acción los leopardos, guepardos y, más tarde, hace aproximadamente 1,6 millones de años, los licaones. De la probable interacción entre éstas y otras especies con *Homo habilis* han persistido ligeros indicios, como los tres antílopes procedentes del lecho I de Olduvai, con certeras fracturas en sus órbitas derechas que sugieren cierta capacidad cazadora de estos homínidos. Pese a la ausencia de pruebas concluyentes, la interacción con depredadores condicionaría el comportamiento de *Homo habilis* e incluso plasmaría su organización social. Su régimen de vida, destinado a procurar una eficaz obtención de alimento y a la defensa del grupo pudo, en los tempranos *Homo*, estar condicionado por la presencia de carnívoros depredadores. (J. Alcázar y A. de Robles.)

Partículas y fuerzas elementales

Se ha ido formando una imagen coherente de los constituyentes fundamentales de la materia y de las fuerzas que los gobiernan. Abarca distintas teorías que podrían pronto unificarse en una descripción global de los sucesos naturales

Chris Quigg

La idea de que bajo la diversidad manifiesta del universo subyace una simplicidad fundamental ha llevado lejos a la física. A lo largo de la historia, la lista de las partículas y fuerzas consideradas elementales ha ido cambiando sin cesar, conforme los análisis de la materia y sus interacciones, cada vez más finos, sacaban a la luz nuevos microcosmos dentro de los microcosmos: átomos dentro de las moléculas, núcleos y electrones dentro de los átomos y niveles de estructura sucesivamente más profundos del interior nuclear. Sin embargo, a lo largo de la última década, los resultados experimentales y la convergencia de los desarrollos teóricos han aportado nueva coherencia a la física de partículas, avivando la esperanza de hallarnos en el umbral de una comprensión sólida de las leyes que rigen la naturaleza.

Aceleradores que producen energías de intensidad creciente han posibilitado la colisión entre partículas con mayor violencia y así abrir el reino subatómico hasta detalles cada vez más finos: el límite de la resolución experimental se cifra hoy en unos 10^{-16} centímetros, la milésima parte del diámetro del protón. Diez años atrás, la física conocía centenares de partículas aparentemente elementales; con la resolución actual se ha demostrado que esa multiplicidad resulta de combinaciones de un número mucho menor de entidades fundamentales. Al propio tiempo, se ha empezado a ver cómo las fuerzas a través de las cuales interaccionan estos constituyentes muestran similitudes subyacentes. Se ha establecido así una honda conexión entre dos de las fuerzas, la electromagnética y la fuerza débil, habitual en las desintegraciones nucleares; y se habla razonadamente de una descripción de las fuerzas fundamentales que englobe también la interacción fuerte que liga los núcleos atómicos.

Entre las partículas que parecen carecer de estructura, indivisibles y, por tanto, fundamentales, los leptones no están afectados por la interacción fuerte. Se han identificado seis clases distintas de ellos; *sabores* los llaman los físicos en un derroche de imaginación. Tres leptones –electrón, muon y tau– tienen la misma carga eléctrica: -1; difieren, sin embargo, en su masa: el electrón es el más ligero y el tau el más pesado. Los otros tres, los neutrinos, son, como su nombre sugiere, eléctricamente neutros. Se ha visto que dos de éstos, el neutrino electrónico y el neutrino muónico, apenas si tienen masa. A pesar de sus distintas masas, los seis leptones gozan de la misma cantidad de momento angular de espín. Se dice que tienen espín 1/2 porque cada partícula puede girar en una de dos direcciones; se habla de leptón dextrógiro si los dedos doblados de la mano derecha indican su rotación cuando el dedo pulgar apunta en su dirección de movimiento, y, levógiro, cuando los dedos y el pulgar de la mano izquierda indican su espín y dirección.

Leptones

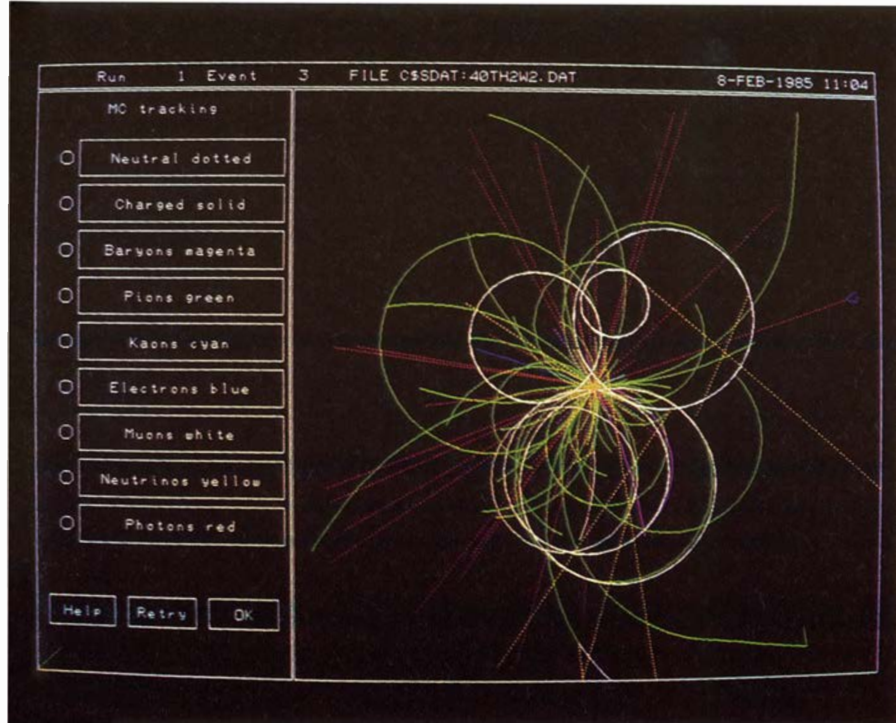
Para cada leptón existe su antipartícula correspondiente o antileptón. Las antipartículas tienen la misma masa y espín que sus respectivas partículas, aunque valores opuestos en otras propiedades, en la carga eléctrica por ejemplo. Los antileptones comprenden el antielectrón o positrón, el antimuón y el antitau, todos con carga positiva, y tres antineutrinos eléctricamente neutros.

Diríase que, en sus interacciones, los leptones respetan límites que definen tres familias, formada cada una de ellas por un leptón cargado y su neutrino. Las familias se distinguen matemáticamente mediante números leptónicos; por ejemplo, el electrón y el neutrino electrónico tienen asignado un número electrónico 1, número muónico 0 y número tauónico 0. A los antileptones se les asigna números leptónicos de signo opuesto. Aunque algunos leptones se desintegran en otros, el número leptónico total de los productos de la desintegración es igual al de la partícula original. Se mantienen, pues, las líneas de familia.

El muon, por ejemplo, es inestable. Después de una vida media de 2,2 microsegundos, se desintegra en un electrón, un antineutrino electrónico y un neutrino muónico, a través de un proceso mediado por la fuerza débil. El número leptónico total permanece inalterado en la transformación. El número muónico del neutrino muónico es 1, el número electrónico del electrón es 1 y el del antineutrino electrónico es -1. Los números electrónicos se anulan dejando inalterado el número muónico inicial, 1. El número leptónico se conserva también en la desintegración del tau, que sobrevive durante una vida media de 3×10^{-13} segundos.

Absolutamente estable es el electrón. La carga eléctrica debe conservarse en todas las interacciones. No existe ninguna partícula cargada de masa menor en la que pueda desintegrarse el electrón. No se ha observado la desintegración de los neutrinos; por representar éstos los miembros de menor masa de sus respectivas familias, su desintegración cruzaría necesariamente los límites familiares.

¿Dónde se observan los leptones? El electrón es habitual transportador de la carga eléctrica en metales y semiconductores. Los antineutrinos electrónicos se emiten en la desintegración beta de los neutrones en protones. Los reactores nucleares, que producen grandes cantidades de neutrones libres inestables, son fuentes abundantes de antineutrinos. Las restantes especies de leptones se producen, principalmente, en las colisiones de alta energía de partículas subnucleares que tienen lugar, de manera natural, cuando los rayos cósmicos interaccionan con la atmósfe-



1. PRODUCTOS de una hipotética colisión de alta energía entre dos protones; se trata de una simulación por ordenador realizada de acuerdo con el comportamiento, conocido y supuesto, que siguen las partículas elementales. James Freeman, del Grupo del Detector del Colisionador del Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi (Fermilab), diseñó el programa de simulación utilizando el modelo ISAJET, creado por Frank E. Paige, Jr., del estadounidense Laboratorio Nacional de Brookhaven. La colisión, de la que se muestran los posibles resultados, se desarrolló a 40 TeV (billones de electronvolt) de energía, muy por encima de las que pueden alcanzarse con los aceleradores actuales. Se supone que la enorme energía da lugar a un bosón de Higgs, una partícula masiva que desempeña un papel fundamental en la teoría, si bien no se ha observado. El bosón de Higgs se desintegra rápidamente en dos bosones *W*, también masivos y de vida corta, que se desintegran, luego, de distintas maneras. Algunas de las partículas cuyas trazas se representan proceden de la desintegración del bosón *W*; otras surgen de la ruptura de los protones incidentes. Los electrones, muones y neutrinos son partículas elementales; los bariones, piones y kaones surgen a partir de otros constituyentes fundamentales; los fotones son cuantos de energía. Se simula aquí un campo magnético que hace que las trayectorias de las partículas cargadas se curven sin que las neutras queden afectadas.

ra y, bajo condiciones controladas, en los aceleradores de partículas. Sólo el neutrino tauónico no se ha observado directamente, si bien la acumulación de pruebas indirectas en favor de su existencia mueve a su aceptación.

Quarks

Las partículas subnucleares que experimentan la interacción fuerte forman la segunda gran categoría de partículas que se estudian en el laboratorio. Se trata de los hadrones: protones, neutrones, mesones y otros. La muchedumbre de estos “otros”, menos familiares, existe sólo de manera efímera, como producto de colisiones de alta energía, a partir de las cuales se materializan partículas de masa ingente, muy inestables. Se han catalogado centenares de especies de hadrones con diferentes masas, espines, cargas y propiedades diversas.

Pero los hadrones no son partículas elementales, pues tienen estructura interna. En 1964, Murray Gell-Mann, del Instituto de Tecnología de California, y George Zweig, que trabajaba entonces en el CERN ginebrino, laboratorio europeo de física de partículas, se aprestaron a explicar, cada uno por su cuenta, la desconcertante variedad de hadrones. Sugirieron que eran partículas compuestas, distintas combinaciones de un pequeño número de constituyentes fundamentales. Gell-Mann les llamó *quarks*. Experimentos realizados en el Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) a finales de la década de los sesenta, en los que se lanzaron electrones de alta energía contra protones y neutrones, reforzaron la hipótesis. La distribución de energías y ángulos de los electrones dispersados indicaba que algunos habían chocado con objetos puntuales eléctricamente cargados en el interior de protones y neutrones.

La física de partículas atribuye hoy todas las clases de hadrones conocidas a combinaciones de estas entidades fundamentales. Se han identificado cinco clases de quarks, denominadas también sabores: “up” o arriba (u), “down” o abajo (d), encantado (c), extraño (s) y “bottom” o fondo (b); además, se cree que existe un sexto sabor, el quark “top” o cima (t). Al igual que los leptones, los quarks tienen media unidad de espín y existen en estados levógiros y dextrógiros. Están dotados de carga eléctrica, que vale una fracción determinada de la del electrón; los quarks d, s y b tienen una carga de $-1/3$; los u, c y el supuesto t poseen, por su parte, una carga de $+2/3$. A los correspondientes antiquarks se les asignan las mismas cargas eléctricas, aunque de signo opuesto.

Tales cargas fraccionarias nunca se observan en los hadrones, pues los quarks forman combinaciones donde la suma de sus cargas es entera. Los mesones, por ejemplo, constan de un quark y un antiquark, cuyas cargas suman -1, cero o más uno. Los protones están formados por dos quarks u y un quark d, con una carga total $+1$; los neutrones, por un quark u y dos quarks d, con una carga total 0.

Como los leptones, los quarks experimentan interacciones débiles que cambian una especie, o sabor, en otra. Así, en la desintegración beta de un neutrón en un protón, uno de los quarks d del neutrón se transforma en un quark u; a lo largo de este proceso emite un electrón y un antineutrino. Se han observado transformaciones similares de quarks c en quarks s. El esque-

LEPTONES			
NOMBRE DE LA PARTICULA	SIMBOLO	MASA EN REPOSO (MeV/c^2)	CARGA ELECTRICA
NEUTRINO ELECTRONICO	ν_e	PROXIMA A 0	0
ELECTRON	e o e^-	0,511	-1
NEUTRINO MUONICO	ν_μ	PROXIMA A 0	0
MUON	μ o μ	106,6	-1
NEUTRINO TAUONICO	ν_τ	MENOS DE 164	0
TAU	τ o τ^-	1784	-1

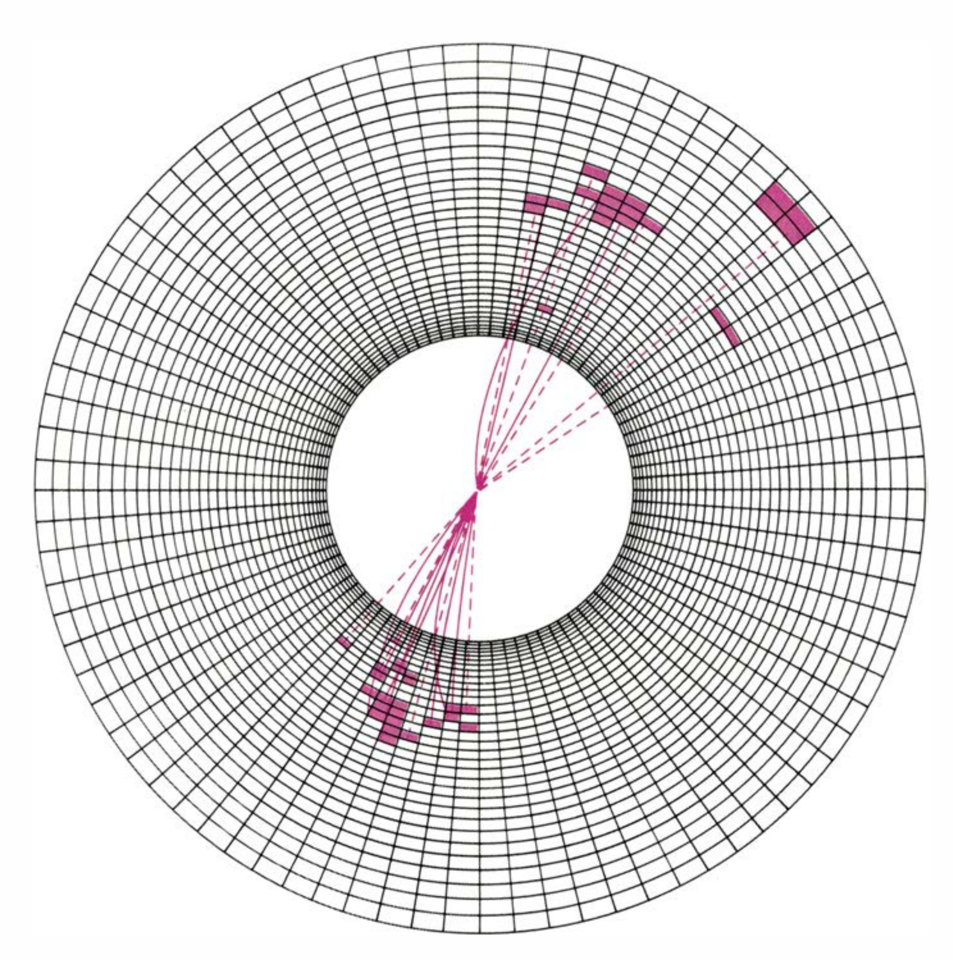
QUARKS			
NOMBRE DE LA PARTICULA	SIMBOLO	MASA EN REPOSO (MeV/c^2)	CARGA ELECTRICA
ARRIBA	u	310	$2/3$
ABAJO	d	310	$-1/3$
ENCANTADO	c	1500	$2/3$
EXTRAÑO	s	505	$-1/3$
CIMA/VERDAD	t	>22.500 PARTICULA HIPOTETICA	$2/3$
FONDO/BELLEZA	b	PROXIMA A 5000	$-1/3$

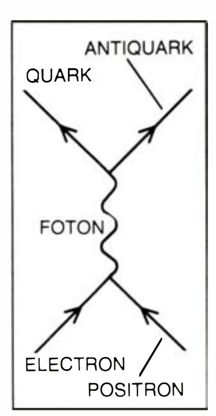
FUERZA	ALCANCE	INTENSIDAD A 10^{13} CM, EN COMPARACION CON LA FUERZA FUERTE	PORTADOR	MASA EN REPOSO (GeV/c^2)	ESPIN	CARGA ELECTRICA	COMENTARIOS
GRAVITACION	INFINITO	10^{-38}	GRAVITON	0	2	0	CONJETURADO
ELECTROMAGNETISMO	INFINITO	10^{-2}	FOTON	0	1	0	OBSERVADO DIRECTAMENTE
DEBIL	MENOS DE 10^{-16} CENTIMETROS	10^{-13}	BOSONES INTERMEDIAR. W^+	81	1	$+1$	OBSERVADO DIRECTAMENTE
			W^-	81	1	-1	OBSERVADO DIRECTAMENTE
			Z^0	93	1	0	OBSERVADO DIRECTAMENTE
FUERTE	MENOS DE 10^{-13} CENTIMETROS	1	GLUONES	0	1	0	PERMANENTEMEN. CONFINADOS

2. ESQUEMA FUNDAMENTAL DE LA NATURALEZA, según la teoría que domina hoy. Abarca 12 partículas elementales (*arriba*) y cuatro fuerzas (*abajo*). Se cree que todas las partículas aquí mencionadas carecen de estructura y son indivisibles; entre sus propiedades, hay una idéntica cantidad de espín, convencionalmente dada por 1/2, y distintos valores de la carga eléctrica, carga de color y masa, medida en términos energéticos en millones de electronvolt (MeV), dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz (*c*). En la materia ordinaria sólo se encuentran las parejas de leptones y quarks de la parte superior de cada columna; las otras partículas se observan fugazmente tras las colisiones de alta energía. Las cuatro fuerzas que se supone gobiernan la materia varían en alcance e intensidad; aunque la interacción fuerte es la más potente, actúa sólo a distancias inferiores a los 10^{-13} centímetros, valor del diámetro del protón. Todas las fuerzas se transmiten por partículas de fuerza, cuyas masas se dan en miles de millones de electronvolt (GeV) divididas por el cuadrado de la velocidad de la luz. A causa de su debilidad, la gravitación no se ha estudiado experimentalmente en física de partículas.

ma de desintegraciones sugiere el agrupamiento en dos familias, una de las cuales abarcaría los quarks *u* y *d* y la otra los quarks *c* y *s*. En abierto contraste con el comportamiento de los leptones, algunas desintegraciones de quarks cruzan los lindes familiares; se han observado transformaciones de quarks *u* en quarks *s*, así como de quarks *c* en quarks *d*. La semejanza de las dos familias conocidas de quarks con las familias de leptones dio pie a pensar en la existencia de un quark *t*, que acompañara al quark *b* en una tercera familia.

A diferencia de lo que ocurre con los leptones, nunca se han observado quarks libres. Pero han ido incrementando sin pausa las pruebas circunstanciales de su existencia. Muestra de la solidez del modelo de quarks es su éxito a la hora de predecir el resultado de las colisiones, a altas energías, entre un electrón y un positrón. Como representan materia y antimateria, las dos partículas se aniquilan entre sí, liberando energía del fotón. El modelo quark predice que la energía en forma de un fotón puede materializarse en un quark y un antiquark. Ahora bien, puesto que el par colisionante electrón-positrón tiene un momento resultante nulo, el quark y el antiquark saldrán en direcciones opuestas y a velocidades iguales, de suerte que su momento resultante sea también cero. Los propios quarks permanecen inobservables porque su energía se convierte en quarks y antiquarks adicionales que se materializan y combinan con el par original, dando lugar a dos chorros de hadrones (la mayor parte de ellos piones, cierto tipo de mesones). Tales chorros se observan realmente; su naturaleza focalizada confirma que los hadrones no surgen directamente de la colisión, sino de partículas individuales e indivisibles cuyas trayectorias persisten en los chorros.





3. MANIFESTACION DE LOS QUARKS: dos chorros estrechos de partículas emergen de la colisión y aniquilación mutua de un electrón y un antielectrón, o positrón. La aniquilación libera energía, que da lugar a materia. Las partículas detectadas tienen masas y espines distintos; las hay neutras (*líneas de trazos*) y cargadas eléctricamente (*líneas continuas*). Si las partículas surgieran de la aniquilación, seguirían trayectorias divergentes. El carácter focalizado de los chorros sugiere, en cambio, que cada uno de ellos se ha desarrollado a partir de un único precursor: un quark o un antiquark. Son los productos inmediatos del fotón de energía electromagnética liberado en la colisión, que se representa a la izquierda utilizando flechas para caracterizar el movimiento relativo de las partículas. El suceso que se muestra fue registrado en el detector JADE del acelerador PETRA, perteneciente al Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), de Hamburgo. Las trayectorias de las partículas se reconstruyeron mediante ordenador, a partir de las trazas de ionización y del esquema de energía depositada (*color*) cuando las partículas inciden sobre la capa interior del detector cilíndrico de 2,4 metros de largo.

Psi y hypsilon

La existencia real de los quarks recibe también apoyo de la diversidad de niveles energéticos, o masas, con que pueden observarse ciertas clases de hadrones, principalmente las partículas psi y hypsilon, en los experimentos de aceleradores. Tales espectros de energía resultan análogos a los espectros atómicos: parecen representar los estados cuánticos de un sistema ligado de dos componentes menores. Cada uno de sus estados cuánticos representaría un grado diferente de excitación y distinta combinación de los espines y el movimiento orbital de los componentes. Para la mayoría de los físicos, la conclusión según la cual tales partículas están formadas por quarks es inevitable. Se cree que la partícula psi consta de un quark *c* y de un antiquark, mientras que la partícula hypsilon contendría un quark *b* y su antiquark.

¿Qué reglas rigen las combinaciones de quarks que forman los hadrones? Los mesones constan de un quark y un antiquark. Por tener cada quark un espín 1/2, el espín resultante de un mesón valdrá cero si sus constituyentes giran en direcciones opuestas, y 1 si lo hacen en la misma dirección; ahora bien, en sus estados excitados, los mesones pueden tener valores mayores de espín, gracias al movimiento orbital de los quarks. Los otros hadrones, los bariones, están formados por tres quarks cada uno. De la suma de los posibles espines y direcciones de los quarks constituyentes se infieren los valores posibles para el espín de los bariones menos energéticos: 1/2 y 3/2. No se ha observado ninguna otra combinación de quarks; los hadrones que estarían formados por dos o cuatro quarks parecen quedar excluidos.

La razón está relacionada con la respuesta a otra paradoja. Según el principio de exclusión de Wolfgang Pauli, dos partículas que ocupen una pequeña región del espacio y posean espines semienteros no pueden tener el mismo

número cuántico: idénticos valores de momento, carga y espín. El principio de exclusión de Pauli explica, de manera elegante, la configuración de los electrones que determinan el lugar de un elemento en la tabla periódica. Deberíamos esperar que constituyera también una guía fiable en la disposición de los hadrones. Sin embargo, el principio parecería sugerir que hadrones exóticos tales como las partículas delta doblemente positivas y la omega menos, que se materializan breves instantes en las colisiones de altas energías, no pueden existir. Constan de tres quarks u y tres quarks s, respectivamente; tienen un espín 3/2. Los tres quarks de cada hadrón de éstos deben ser idénticos en espín, así como en otras propiedades; ocuparán, por ende, el mismo estado cuántico.

Colores

Para explicar tales combinaciones observadas, es necesario suponer que los tres quarks, por un lado idénticos, se distinguen en razón de otra característica: una nueva clase de carga, caprichosamente llamada *color*, sobre la que actúa la interacción fuerte. Cada sabor de quark puede llevar una de tres clases de carga de color: roja, verde o azul. A un quark rojo le corresponde un antiquark con una carga de color antirroja (que puede imaginarse como cian); los otros antiquarks llevan cargas antiverde (magenta) y antiazul (amarilla).

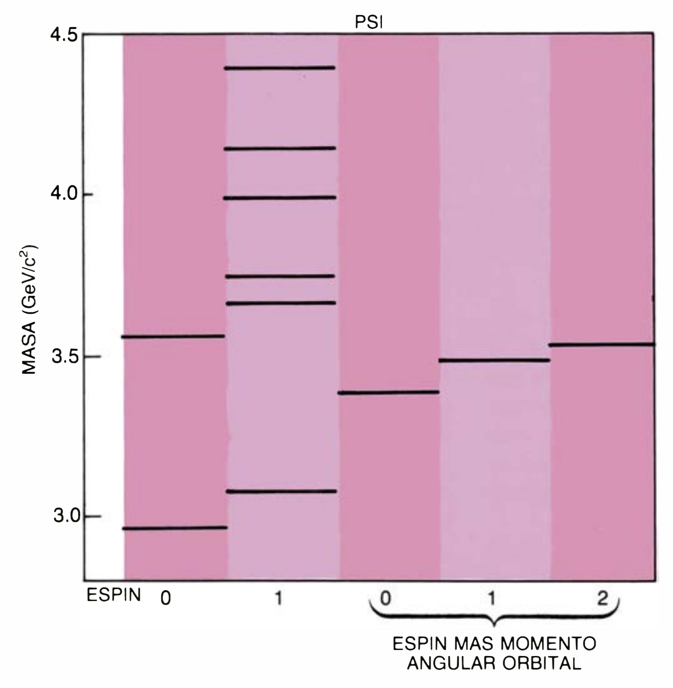
La analogía entre esta nueva clase de carga y el color permite establecer las reglas de combinación de los quarks. Los hadrones no presentan carga de color; la suma de los colores de los quarks componentes debe ser blanca o de color neutro. Por tanto, las únicas combinaciones permitidas serán las de un quark y su antiquark, que originan mesones, y las de un quark rojo, uno verde y uno azul, que forman los bariones.

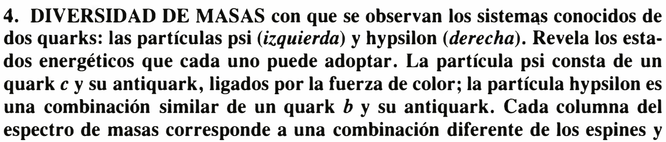
Los estados coloreados nunca se ven aislados. Esta ocultación encaja con otro hecho: los quarks libres, que llevan una carga de color, no se han observado nunca. La actividad de la interacción fuerte entre quarks coloreados debe ser de extraordinaria potencia, la suficiente quizá para confinar permanentemente los quarks dentro de hadrones incoloros, de color neutro. De acuerdo con el modelo quark, la descripción de las colisiones violentas electrón-positrón supone, sin embargo, que los quarks que originan los chorros de hadrones observados se separan libremente durante el primer instante que sigue a la colisión. La independencia aparente de los quarks a distancias muy pequeñas se conoce como *libertad asintótica*. La describieron, en 1973, David J. Gross y Frank Wilczek, de la Universidad de Princeton, junto con H. David Politzer, que estaba entonces en la de Harvard.

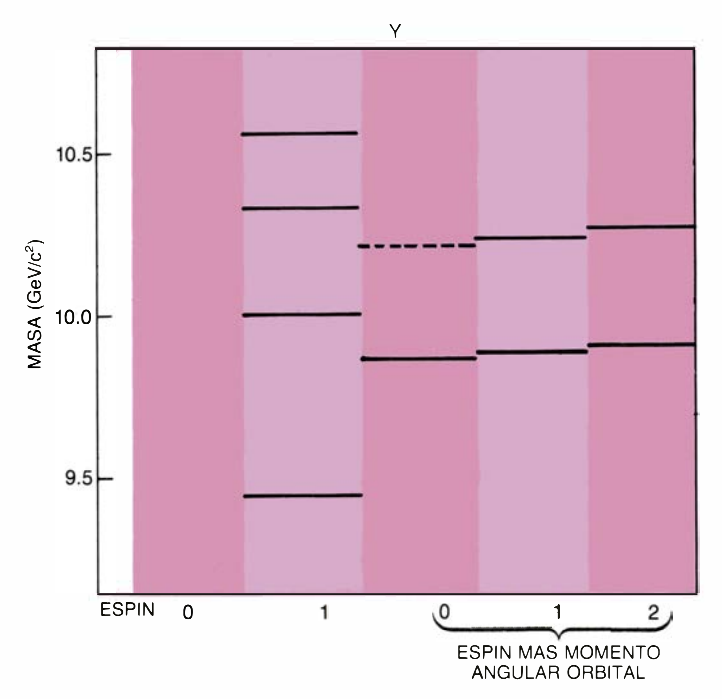
Para entender una situación paradójica, en la que los quarks sólo interaccionan débilmente cuando están muy juntos y, en cambio, no pueden separarse, recurramos a una analogía: imaginemos un hadrón como una burbuja que protege a los quarks, de la cual no pueden salir. En el interior de la burbuja los quarks se mueven con entera libertad. No hace falta decirlo, la burbuja es sólo una metáfora del comportamiento dinámico de la fuerza entre quarks. Una explicación más completa de lo que se conoce como confinamiento de los quarks vendrá de un examen de las fuerzas a través de las cuales interaccionan las partículas.

Interacciones fundamentales

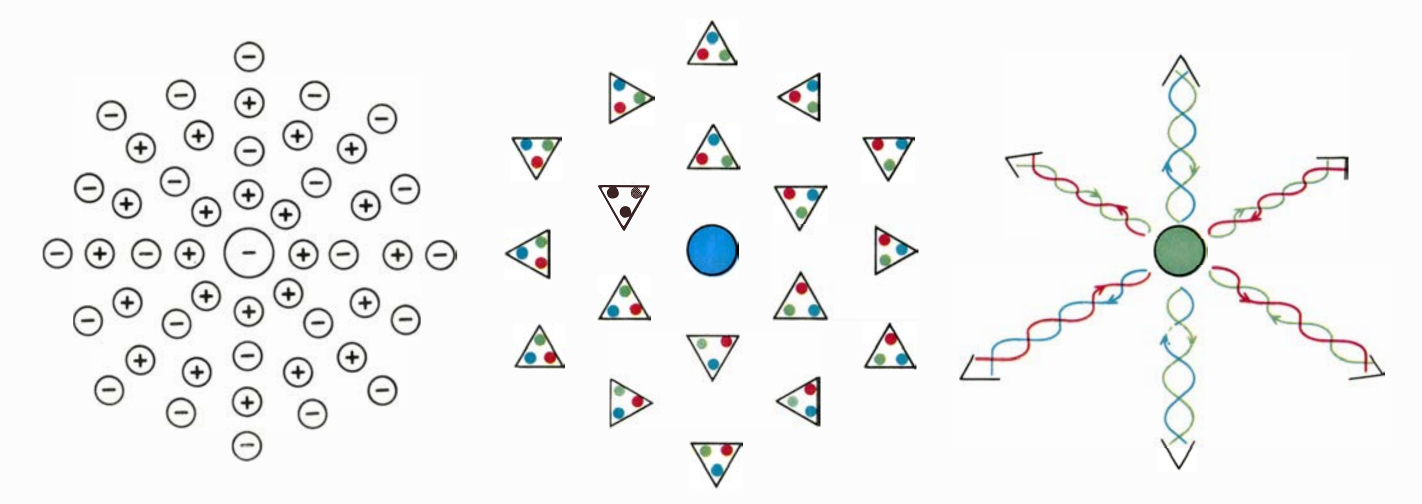
La naturaleza ha desarrollado una vastísima complejidad de estructuras y dinámicas a partir de los seis leptones y los seis quarks que se consideran constituyentes fundamentales de la materia. Cuatro fuerzas rigen sus relaciones: el electromagnetismo, la gravitación, la interacción fuerte y la débil. En el mundo de nuestra experiencia diaria, una fuerza viene a ser un agente que altera la velocidad de un cuerpo cambiando su módulo o dirección. En el reino de las partículas elementales, donde la mecánica cuántica y la relati-







4. DIVERSIDAD DE MASAS con que se observan los sistemas conocidos de dos quarks: las partículas psi (*izquierda*) y hypsilon (*derecha*). Revela los estados energéticos que cada uno puede adoptar. La partícula psi consta de un quark *c* y su antiquark, ligados por la fuerza de color; la partícula hypsilon es una combinación similar de un quark *b* y su antiquark. Cada columna del espectro de masas corresponde a una combinación diferente de los espines y los momentos angulares orbitales de los quarks. Las distintas masas o, equivalentemente, los niveles energéticos de una columna, representan niveles de excitación cuánticos. El parecido de estos espectros con el de los átomos pone de manifiesto que la psi y la hypsilon, así como otras partículas afines, resultan ser sistemas ligados de constituyentes menores. Tales espectros nos informan del comportamiento seguido por la fuerza de color en cortas distancias.



5. EFECTOS DE APANTALLAMIENTO Y CAMUFLAJE modifican el comportamiento de las fuerzas fundamentales con la distancia. El panel de la izquierda muestra un electrón en el vacío. Está rodeado de pares virtuales de vida corta de electrones y positrones que, en la teoría cuántica, pueblan el vacío. El electrón atrae los positrones virtuales y repele los electrones virtuales, apantallándose, por tanto, a sí mismo con carga positiva. Cuanto más lejos del electrón esté una carga real, tanto más ancha será la pantalla interpuesta de cargas virtuales positivas y menor la carga efectiva del electrón. La fuerza de color está sujeta al mismo efecto de pantalla (*centro*). Cargas de color virtuales (principalmente pares quark-antiquark) llenan el vacío; un quark coloreado atrae los colores opuestos, rodeándose, por tanto, con una pantalla que reduce su carga efectiva a medida que la distancia crece. Pero el efecto de camuflaje se opone al apantallamiento. Un quark radia y reabsorbe gluones que llevan su carga de color a distancias considerables y la cambian, en este caso, de azul a verde (*derecha*). La magnitud entera de una carga sólo puede sentirse fuera del espacio que ocupa. Por tanto, el camuflaje tiende a incrementar la fuerza experimentada por otro quark a medida que se aleja del primero hacia el límite de la región de la carga de color. Del apantallamiento y el camuflaje resulta lo siguiente: a distancias cortas, la interacción fuerte es más débil, mientras que a distancias grandes es más fuerte.

vidad sustituyen a la mecánica newtoniana del mundo que nos rodea, se impone una noción de fuerza más general, y con ella un término más amplio, el de *interacción*. Una interacción puede desencadenar cambios de energía, momento o clase entre varias partículas colisionantes; la interacción afecta también a una partícula aislada, en un proceso de desintegración espontánea.

Tan sólo la gravitación no se ha estudiado a la escala en la que existen las partículas elementales; sus efectos, pequeñísimos, en masas tan diminutas pueden ignorarse tranquilamente. Los físicos han intentado, con considerable éxito, predecir el comportamiento de las otras tres interacciones a través de descripciones matemáticas conocidas como teorías "gauge" o de aforo.

La noción de simetría es central en las teorías de aforo. En sentido matemático, surge una simetría cuando persisten las soluciones de un conjunto de ecuaciones aunque se altere una característica del sistema que describen. Si una teoría matemática sigue siendo válida cuando se cambia una característica del sistema en una cantidad idéntica en cada punto del espacio, puede decirse que las ecuaciones presentan una simetría global con respecto a dicha característica. Si este rasgo puede alterarse independientemente en cada punto del espacio y la teoría permanece válida, sus ecuaciones presentarán simetría local con respecto a la característica en cuestión.

Se acepta hoy que cada fuerza fundamental surge de la invariancia de una ley de la naturaleza, así la conservación de la carga o la energía, bajo una operación de simetría local en la que se altera cierto parámetro, independientemente, en cada punto del espacio. La analogía con un disco de goma ideal puede ayudar a visualizar el efecto de las matemáticas. Si la forma del disco de goma se compara con un principio natural y el desplazamiento de un punto del disco se considera una operación de simetría local, el disco debe mantener su forma aun cuando cada uno de sus puntos se desplace independientemente. Los desplazamientos estiran el disco e introducen fuerzas entre puntos. Análogamente, en las teorías de aforo, las fuerzas fundamentales son las consecuencias inevitables de operaciones de simetría local; aparecen para preservar la simetría.

De las tres interacciones estudiadas en el dominio de las partículas elementales, sólo el electromagnetismo se experimenta en la vida diaria, habitual en forma de luz solar, de la chispa de una descarga estática y del suave giro de una aguja de brújula. En el nivel subatómico, toma un aspecto poco corriente. Según la teoría cuántica relativista, que relaciona materia y energía, las interacciones electromagnéticas están mediadas por fotones: "partículas de fuerza", sin masa, que llevan cantidades determinadas de energía. La teoría cuántica del electromagnetismo que describe las interacciones, mediadas por fotones, entre partículas cargadas eléctricamente, se conoce como *electrodinámica cuántica* (QED).

Como las otras teorías de las interacciones fundamentales, la QED es una teoría de aforo. En ella, la fuerza electromagnética se deduce exigiendo que las ecuaciones que describen el movimiento de una partícula cargada permanezcan inalteradas en el proceso de operaciones de simetría local. En particular, si la fase de la función de ondas mediante la que se describe una partícula cargada en la teoría cuántica se modifica independientemente en cada punto del espacio, la QED exige que la interacción electromagnética y su partícula mediadora, el fotón, existan para mantener la simetría.

Utilizando los métodos de cálculo desarrollados por Richard P. Feynman y otros científicos, se han logrado predicciones de enorme exactitud, tales como los efectos infinitesimales de los fotones radiados y absorbidos por un electrón sobre el momento magnético generado por el espín natural del electrón. Además, la descripción de la QED para la interacción electromagnética se ha comprobado en un rango extraordinario de distancias, que varía desde menos de 10^{-18} metros hasta más allá de 10^{8} metros.

Apantallamiento

En particular, la QED ha explicado el debilitamiento efectivo de la carga electromagnética con la distancia. La carga eléctrica de un objeto es una can-

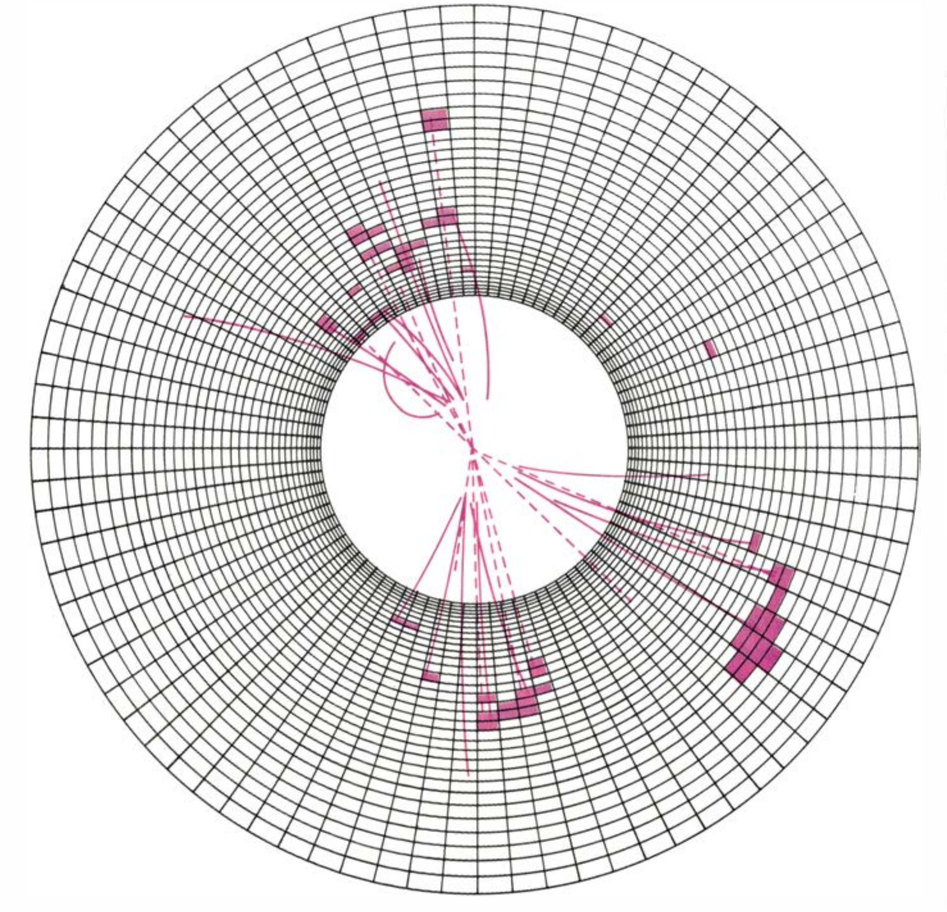
tidad fija y definida. Sin embargo, cuando una carga eléctrica está rodeada por otras que se mueven libremente, sus efectos pueden modificarse. Por ejemplo, si un electrón penetra en un medio formado por moléculas que tienen extremos cargados positiva y negativamente, las polariza. El electrón repele sus extremos negativos y atrae los positivos, apantallándose a sí mismo con carga positiva. El resultado de la polarización consiste en reducir la carga efectiva del electrón en una cantidad que aumenta con la distancia. Sólo cuando el electrón se inspecciona desde distancias muy cortas –en una escala submolecular, en el interior de la pantalla de cargas positivas– aparece toda su carga.

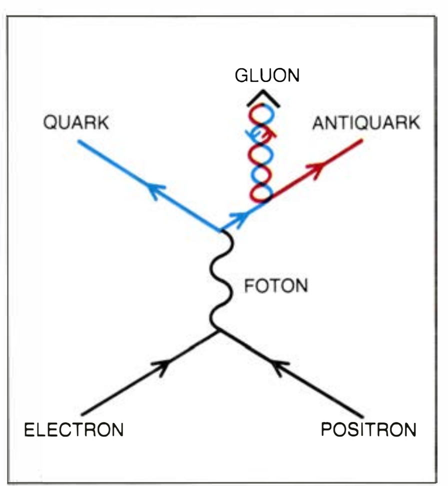
Tal efecto de apantallamiento, en principio, no debería surgir en el vacío, donde no hay moléculas que puedan polarizarse. Ahora bien, el principio de incertidumbre de Werner Heisenberg sugiere que el vacío no está vacío. De acuerdo con aquel principio, la incertidumbre acerca de la energía de un sistema aumenta a medida que se examina en escalas de tiempo progresivamente más cortas. Las partículas pueden violar la ley de la conservación de la energía durante instantes lo suficientemente breves para escapar a la observación; pueden convertirse en materia a partir de nada. En la QED, el vacío aparece como un medio complicado y en agitación, en el que pares de partículas "virtuales" cargadas, en particular electrones y positrones, tienen una existencia fugaz. Estas efímeras fluctuaciones del vacío son tan polarizables como las moléculas de un gas o un líquido. En consecuencia, la QED predice que la carga eléctrica estará también apantallada en el vacío, y reducida a grandes distancias.

La interacción fuerte que afecta a los quarks, basada en la carga de color, varía también con la distancia. Mas lo hace de manera inversa: con la distancia, la carga de color no se debilita, se torna más fuerte. A menos de 10^{-13} centímetros, diámetro de un protón, disminuye lo suficiente para permitir cierto grado de independencia a los quarks mutuamente ligados. Sin embargo, la explicación de este peculiar comportamiento se encuentra en una teoría inspirada en la QED. Es una teoría llamada *cromodinámica cuántica* (QCD), la teoría de aforo de las interacciones fuertes.

Como la QED, la QCD postula partículas de fuerza que median en las interacciones. Los quarks coloreados interaccionan a través del intercambio de entidades llamadas *gluones*, al igual que las partículas cargadas intercambian fotones. Mientras que la QED reconoce sólo una clase de fotón, la QCD admite ocho clases de gluones. En contraste con los fotones de la QED, que no alteran la carga de las partículas interaccionantes, la emisión o absorción de un gluon puede cambiar el color de un quark; cada uno de los ocho gluones es portador de una transformación distinta. El propio gluon mediador es coloreado, llevando, a la vez, un color y un anticolor.

La posesión de carga de color por parte de los gluones, en contraste con los fotones de la QED, eléctricamente neutros, explica los comportamientos diferentes con la distancia de las interacciones electromagnética y fuerte. En la QCD dos efectos concurrentes gobiernan la carga efectiva: el apantallamiento, análogo al apantallamiento de la QED, y un nuevo efecto conocido como *camuflaje*. El apantallamiento, o polarización del vacío, se parece al de la interacción electromagnética. El vacío de la QCD está poblado de pares de quarks y antiquarks virtuales, parpadeando entre la existencia y la no existencia. Si se introduce un quark en el vacío, las partículas virtuales que llevan cargas de color opuestas se sentirán





6. SUCESO DE TRES CHORROS, registrado en el detector JADE. Confirma la existencia del gluon, partícula mediadora de la fuerza de color. Un electrón y un positrón chocan a alta energía, creando un quark y un antiquark, como en el suceso que recoge la figura 3. Aquí, uno de los quarks radia un gluon (*arriba*). Los quarks y el gluon divergen; cada uno da rápidamente lugar a un chorro de partículas que mantiene la trayectoria de la entidad original (*izquierda*). El suceso pone de manifiesto la libertad asintótica de los quarks y gluones: su habilidad para moverse dentro de una región muy pequeña, a pesar de la enorme intensidad que muestra la fuerza de color a grandes distancias.

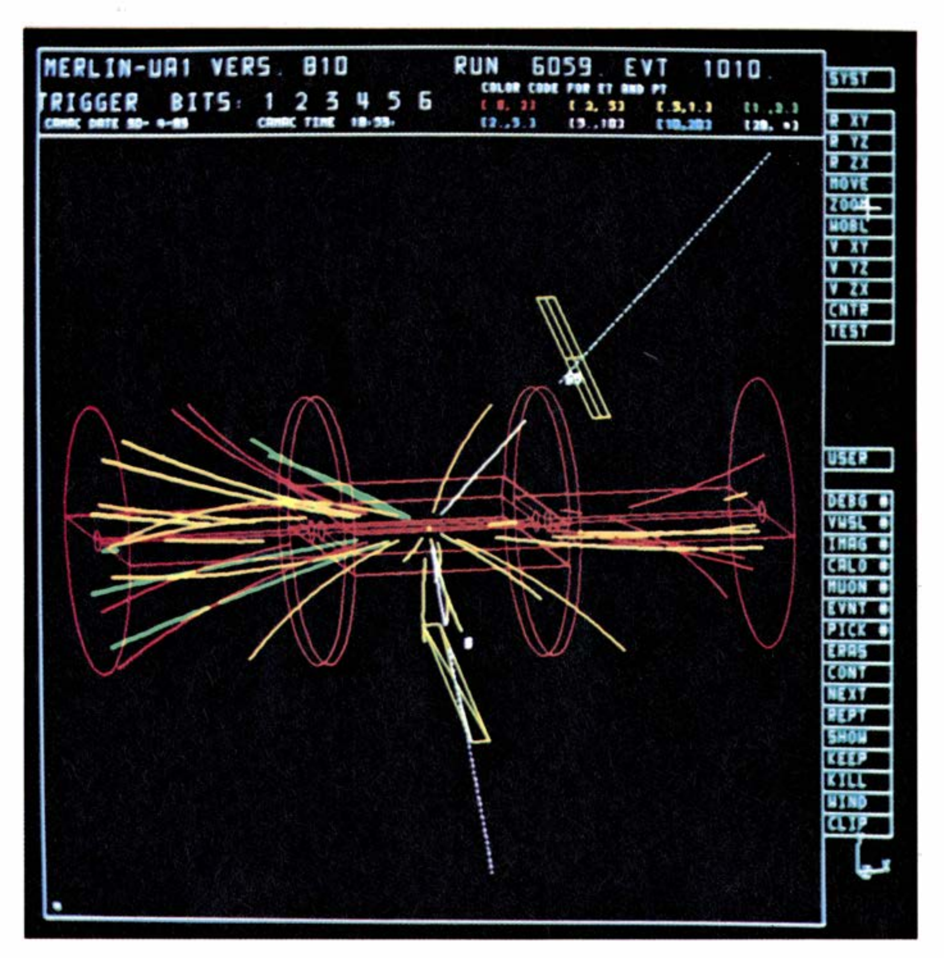
atraídas hacia el quark; las que lleven una carga semejante serán repelidas. Por tanto, la carga de color del quark quedará escondida dentro de una nube de colores distintos, que sirve para reducir la carga efectiva del quark a distancias mayores.

Camuflaje

Sin embargo, dentro de este vacío polarizado, el propio quark emite y reabsorbe gluones continuamente, cambiando, en consecuencia, su color. Los gluones con carga de color se propagan a distancias apreciables. Dispersan la carga de color a través del espacio, camuflando así al quark que es la fuente de la carga. Cuanto menor sea una región arbitraria del espacio centrada en el quark, tanto menor será la proporción de carga de color del quark contenida en ella. Así, la carga de color percibida por un quark de otro color disminuirá a medida que se aproxima al primer quark. Sólo a distancias grandes se manifestará toda la cantidad de carga de color.

En la QCD, el comportamiento de la interacción fuerte representa el efecto resultante del apantallamiento y el camuflaje. Las ecuaciones de la QCD nos hablan de un comportamiento coherente con la observada paradoja de los quarks: están a la vez permanentemente confinados y asintóticamente libres. Se calcula que la interacción fuerte adquiere una intensidad extraordinaria a distancias apreciables, produciendo el confinamiento de los quarks, pero que se debilita y libera a los quarks en distanciamientos muy cortos.

En este régimen de distancias cortas que se analiza en las colisiones de alta energía, las interacciones fuertes se encuentran tan debilitadas que se pueden describir utilizando los métodos desarrollados, en el contexto de la QED, para la interacción electromagnética, mucho más débil. Así pues, parte de la precisión que caracteriza a la QED puede trasladarse a la QCD. Por ejemplo, la evolución de los chorros de hadrones a partir de un quark y un antiquark, generados en una aniquilación electrón-positrón, es una interacción fuerte. La QCD predice que, con una energía de colisión suficientemente alta, el quark y el antiquark, alejándose en direcciones opuestas, generarán tres chorros de hadrones y no sólo dos. Una de las partículas radiará un gluon que se moverá en una tercera dirección. Se convertirá también en hadrones, dando lugar a un tercer chorro distinto.



7. **SEÑAL DE LA PARTICULA Z^0, visible en una gráfica, sintetizada por ordenador, del detector UA1 del supersincrotrón colisionador de protones del CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas con sede en Ginebra, donde se estableció también la existencia de las partículas W^+ y W^-. Las Z^0, W^+ y W^- son las partículas que transmiten la fuerza débil; su existencia fue predicha por la teoría unificada de las interacciones débiles y electromagnéticas, y su descubrimiento justificó la teoría. Las trazas que se representan dentro del detector corresponden a partículas identificadas a raíz de la colisión a alta energía entre un protón y un antiprotón. Las trazas representadas en blanco son las de un electrón y un positrón, productos de desintegración característicos del Z^0, que se desintegra tras materializarse en la colisión.**

Los tres chorros continúan a lo largo de las trayectorias establecidas por quarks y gluones, los cuales se mueven dentro de un espacio extraordinariamente confinado, inferior a los 10^{-13} centímetros. El quark y el antiquark no pueden continuar como partículas aisladas más allá de esa distancia, el límite de la libertad asintótica. Sin embargo, el confinamiento de los quarks y sus interacciones no es absoluto. Aunque el hadrón considerado como un todo tiene color neutro, sus quarks responden a las cargas de color individuales de los quarks de los hadrones vecinos. La interacción, débil si se compara con las fuerzas de color del interior de los hadrones, genera las fuerza de enlace que mantiene a los protones y neutrones unidos en los núcleos.

Además, parece probable que cuando la materia hadrónica se comprima y caliente a temperaturas extremas, los hadrones pierdan su identidad individual. Las burbujas hadrónicas de la imagen anteriormente utilizada se superponen y se funden, liberando posiblemente a sus quarks y gluones constituyentes para que se muevan a distancias mayores. Tal estado de la materia resultante, llamado *plasma* de quarks y gluones, puede existir en los núcleos de las supernovas que colapsan y en las estrellas de neutrones. Está en estudio la posibilidad de crear en el laboratorio plasma de quarks y gluones, mediante colisiones de núcleos pesados a muy altas energías [véase "Materia nuclear caliente" por Walter Greiner y Horst Stöcker; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1985].

Simetría electrodébil

El conocimiento de la tercera interacción que la física de partículas elementales ha de abordar, la interacción débil, ha progresado también por analogía con la QED. En 1933, Enrico Fermi construyó la primera descripción matemática de la interacción débil, según se manifiesta en la radiactividad

beta, por analogía directa con la QED. Trabajos posteriores revelaron diversas e importantes diferencias entre la fuerza débil y la electromagnética. La fuerza débil actúa sólo a distancias inferiores a 10^{-16} centímetros (que contrasta con el largo alcance del electromagnetismo); está en estrecha asociación con el espín de las partículas interaccionantes. Sólo las partículas dotadas de espín levógiro se ven afectadas por las interacciones débiles en las que se cambia la carga eléctrica, como en la desintegración beta de un neutrón, mientras que las dextrógiras no lo están.

A pesar de estas diferencias, los físicos teóricos extienden la analogía y proponen que la interacción débil, como el electromagnetismo, se transporta mediante una partícula de fuerza, conocida por *bosón intermediario*, la partícula *W* (de "weak", débil). A fin de que pueda actuar de mediador en las desintegraciones en las que la carga cambia, el bosón *W* precisa tener carga eléctrica. El alcance de una fuerza es inversamente proporcional a la masa de la partícula que la transmite; como el fotón es de masa nula, la interacción electromagnética puede actuar a distancias infinitas. El muy corto alcance de la fuerza débil sugiere un bosón extremadamente masivo.

Ciertas conexiones manifiestas entre el electromagnetismo y la interacción débil, incluido el hecho de que la partícula mediadora de la interacción débil se hallara cargada eléctricamente, alentó a los investigadores a proponer una síntesis. Llegó el primer resultado: a partir de la propuesta según la cual las dos interacciones eran sólo diferentes manifestaciones de un único fenómeno subyacente, se calculó la masa del bosón *W*. De la unificación postulada se deducía que, a distancias muy cortas y, por tanto, a muy altas energías, la fuerza débil coincidía con la fuerza electromagnética. Su debilidad mostrada en los experimentos realizados a energías más bajas refleja su corto alcance. Por consiguiente, toda la diferencia en la intensidad aparente de las dos interacciones debe tener su causa en la masa del bosón *W*. Bajo esta hipótesis, la masa del bosón *W* puede estimarse en unas cien veces la del protón.

Para progresar desde la idea preliminar de síntesis hasta el desarrollo de una teoría que unificara las interacciones débil y electromagnética, se precisó medio siglo de experimentos e investigación teórica, que culminó con el trabajo por el que Sheldon Lee Glashow y Steven Weinberg, entonces en la Universidad de Harvard, y Abdus Salam, del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología de Londres y del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, ganaron el premio Nobel de física en 1979. Como la propia QED, la teoría unificada, o electrodébil, es una teoría de aforo deducida de un principio de simetría que se manifiesta en el agrupamiento en familias de quarks y leptones.

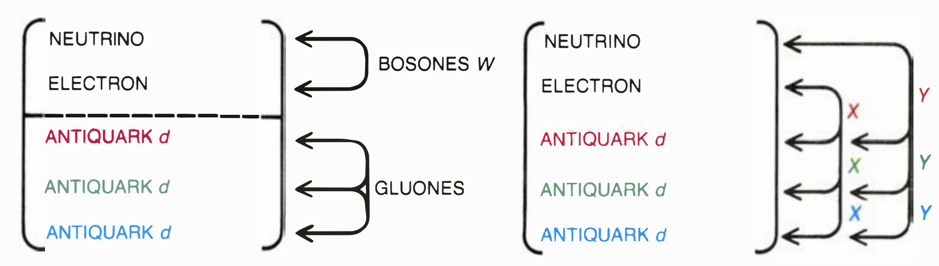
Bosones intermediarios

No uno, sino tres bosones intermediarios, junto con el fotón, hacen de partículas de fuerza en la teoría electrodébil. Son los bosones positiva y negativamente cargados W^+ y W^-, que median, respectivamente, en el intercambio de carga positiva y negativa en las interacciones débiles, y la partícula Z^0, que sirve de mediadora de una clase de interacciones débiles conocida por *corrientes neutras*. Los procesos de corriente neutra, vergibracia, la colisión elástica de un neutrino con un protón –interacción débil ésta en la que no se intercambia carga–, predichos por la teoría electrodébil, se observaron en el CERN en 1973. Representan otro punto de convergencia entre el electromagnetismo y la interación débil, por cuanto las interacciones electromagnéticas tampoco cambian la carga de las partículas implicadas.

Para explicar que las interacciones electromagnética y débil, aunque íntimamente relacionadas, toman diferentes aspectos, la teoría electrodébil defiende que la simetría que las une sólo se manifiesta a altas energías. A otras más bajas permanece oculta. Se puede establecer una analogía con el comportamiento magnético del hierro. Cuando este metal está tibio, sus moléculas, que pueden considerarse como un conjunto de imanes infinitesimales, se hallan en un febril movimiento térmico y, por tanto, orientadas al azar. Contemplado a gran escala, el comportamiento magnético del hierro es idéntico en todas las direcciones, reflejando la simetría rotacional de las leyes del electromagnetismo. Sin embargo, cuando se enfría por debajo de cierta temperatura crítica, las moléculas de hierro se alinean en una dirección arbitraria, dejando el metal magnetizado según un eje. La simetría de las leyes subyacentes está ahora escondida.

El principal factor en la ruptura de la simetría que une el electromagnetismo y la interacción débil a altas energías es una partícula cuya existencia se postula: el *bosón de Higgs*. A través de interacciones con este bosón se generan las masas de los bosones intermediarios, masas que ocultan la simetría. Al bosón de Higgs se le atribuye también que quarks y leptones de una misma familia tengan diferentes masas. Se admite que a muy altas energías todos los quarks y leptones poseen masa nula; a energías menores, las interacciones con la partícula de Higgs dan a quarks y leptones sus distintas masas. Por ser difícil de detectar y gozar quizá de una masa mucho mayor que la de los bosones intermediarios, para producir bosones de Higgs se necesitarán probablemente energías experimentales que transciendan la capacidad de los actuales aceleradores.

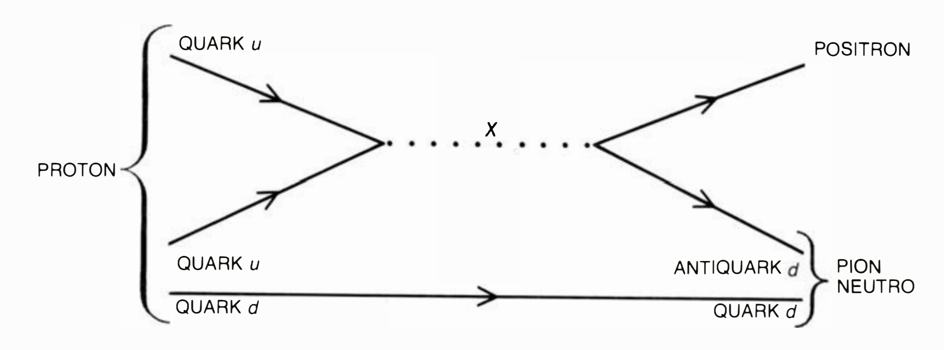
Se han observado los tres bosones intermediarios exigidos por la teoría electrodébil. Las altas energías exigidas para la producción de partículas dotadas de esa masa se alcanzan, preferentemente, en colisiones frontales entre protones y antiprotones. En una de entre unos cinco millones de colisiones, un quark del protón y un antiquark del



8. PARENTESCO ENTRE TODA LA MATERIA. Se ha llegado al mismo a través de las teorías unificadas de las fuerzas fundamentales. Se muestra aquí una rama de una familia unificada de las partículas elementales. Las partículas que son equivalentes dentro de una teoría pueden transformarse unas en otras. Los leptones, así el electrón y el neutrino, responden sólo a la fuerza electrodébil; los quarks lo hacen también a la fuerza fuerte. Ambas clases de partículas no son, pues, equivalentes en la teoría actual, ni se han observado transformaciones de una en otra (*izquierda*). Si las teorías unificadas más sencillas son correctas y las fuerzas fundamentales son en el fondo idénticas, a alguna energía muy alta los quarks y los leptones resultan interconvertibles (*derecha*). Las transformaciones conocidas vienen mediadas por partículas de fuerza tales como los bosones *W* y los gluones; las transiciones entre los grupos de quarks y leptones estarían mediadas por nuevas partículas de fuerza, llamadas en la figura *X* e *Y*.

antiprotón se funden y originan así un bosón intermediario. El bosón se desintegra en menos de 10^{-24} segundos después de su formación. Pero tan fugaz existencia puede detectarse a partir de sus productos de desintegración.

En un triunfo conjunto de la técnica de aceleradores, la física experimental y el razonamiento teórico, equipos internacionales del CERN, dirigidos por Carlo Rubbia, de Harvard, y Pierre Darriulat, diseñaron experimentos que, en 1983, detectaron los bosones W y la partícula Z^0. Un refinado detector identificó y registró, entre los productos de violentas colisiones protón-antiprotón, electrones solos cuyas trayectorias se ajustaban a la esperada en la desintegración de una partícula W^-; el detector registró también electrones y positrones viajando en direcciones exactamente opuestas, evidencia inconfundible de la partícula Z^0. Por su participación en los experimentos y en el diseño y construcción del colisionador protón-antiprotón y del detector, Rubbia y Simon van der Meer, del CERN, recibieron el premio Nobel de física de 1984.



9. DESINTEGRACION DEL PROTON, consecuencia de las transformaciones de los quarks en leptones, fenómeno que las teorías unificadas permitirían. El diagrama muestra una vía de desintegración. Los quarks *u* constituyentes del protón se combinan para dar una partícula *X*, que se desintegra en un antiquark *d* y un positrón (un leptón). El antiquark *d* se combina con el otro quark del protón, un quark *d*, para formar un pion neutro. Como los piones están compuestos de materia y antimateria, son de vida corta; las aniquilaciones mutuas de sus constituyentes liberarán energía en forma de dos fotones. El positrón es efímero: un encuentro con un electrón perdido, su antipartícula, lo convertirá en energía.

Unificación

Disponiendo de la QCD y de la teoría electrodébil, ¿qué queda por entender? Concedido que ambas teorías fueran correctas, ¿podrían ser también completas? Muchas observaciones tienen una explicación, cuando la tienen, sólo parcial mediante las distintas teorías relativas a las interacciones fuertes o a las electrodébiles. Algunas parecen invitar a una unificación más amplia de las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas.

Entre las claves que hablan de esquemas más profundos recordemos el estrecho parecido entre los quarks y los leptones. Las partículas de ambos grupos carecen de estructura, a la resolución experimental actual. Los quarks poseen cargas de color; los leptones no. Ambos, sin embargo, llevan media unidad de espín y participan en las interacciones electromagnéticas y débiles. Además, la propia teoría electrodébil sugiere una relación entre los quarks y los leptones. A menos que cada una de las tres familias de leptones (el electrón y su neutrino, por ejemplo) pueda conectarse con la correspondiente familia de los quarks (los quarks u y d, con sus tres colores), la teoría electrodébil se vería minada por falta de coherencia matemática.

Lo que se sabe acerca de las fuerzas fundamentales apunta también hacia la unificación. Las tres pueden describirse mediante teorías de aforo, muy parecidas en su estructura matemática. Las intensidades de las tres fuerzas convergen, verosímilmente, a distancias muy cortas, fenómeno que sólo se evidenciaría a extraordinarias energías. Hemos visto que la carga electromagnética adquiere una intensidad mayor a cortas distancias, mientras que la carga fuerte, o de color, se torna cada vez más débil. ¿Podrían asimilarse todas las interacciones en presencia de una energía gigantesca?

Si las interacciones son fundamentalmente una e idéntica, la distinción entre los quarks, que responden a la fuerza fuerte, y los leptones, que no lo hacen, se desvanece. En el ejemplo más sencillo de teoría unificada, propuesto por Glashow y Howard Georgi, de Harvard, en 1974, cada conjunto agrupado de quarks y leptones da lugar a una amplia familia que contiene todos los distintos estados de carga y de espín de cada partícula.

El rigor matemático de la organización propuesta de la materia resulta impresionante. Además, las regularidades del esquema exigen que la carga eléctrica esté distribuida entre las partículas elementales en múltiplos de 1/3, exactamente, explicando, por tanto, la neutralidad eléctrica de la materia estable. El átomo es neutro sólo porque, cuando los quarks se agrupan en tríos, como hacen en el núcleo, sus cargas se combinan para dar una que es entero exacto, igual y opuesto a la carga de un número entero de electrones. Si los quarks no estuvieran relacionados con los leptones, la relación precisa de sus cargas eléctricas sería extraña coincidencia.

En tal unificación, sólo se necesita una teoría de aforo para describir todas las interacciones de la materia. En una teoría de aforo, cada partícula de un conjunto puede transformarse en cualquier otra. Las transformaciones de quarks en otros quarks y de leptones en otros leptones, mediadas por gluones y bosones intermediarios, son habituales. Una teoría unificada sugiere que los quarks puedan convertirse en leptones y viceversa. Como en toda teoría de aforo, tal interacción estaría mediada por una partícula de fuerza: un hipotético bosón X o Y. Como las otras teorías de aforo, la teoría unificada describe la variación con la distancia de las intensidades de interacción. Según la más sencilla de las teorías unificadas, las interacciones fuerte y electrodébil convergen y se convierten en una única interacción a una distancia de 10^{-29} centímetros, que corresponde a una energía de 10^{24} electronvolt.

Tal energía es mucho más elevada de lo que podrá nunca alcanzarse con un acelerador, pero ciertas consecuencias de la unificación pueden ser patentes, incluso en el mundo de baja energía que habitamos. La suposición de que las transformaciones pueden cruzar el límite entre los quarks y los leptones implica que la materia, mucha de cuya masa está formada por quarks, puede desintegrarse. Si, por ejemplo, los dos quarks u de un protón se aproximaran uno a otro a menos de 10^{-29} centímetros, podrían combinarse para formar un bosón X, que se desintegraría en un positrón y un antiquark d. Entonces, el antiquark se combinaría con el quark remanente en el protón, un quark d, para formar un pion neutro que, a su vez, se desintegraría rápidamente en dos fotones. En el transcurso de este proceso, la mayor parte de la masa del protón se convertiría en energía.

La observación de la desintegración

del protón daría un considerable apoyo a la teoría unificada. Tendría también consecuencias cosmológicas interesantes. El universo contiene mucha más materia que antimateria. Como materia y antimateria son equivalentes en casi todos los aspectos, es atractivo suponer que el universo se formó con iguales cantidades de ambas. Si el número de bariones –partículas de tres quarks, como el neutrón y el protón, que constituyen la mayor parte de la materia ordinaria– puede cambiar, según revelaría la desintegración del protón, el exceso actual de materia no representaría el estado inicial del universo. Podía haber habido, al principio, cantidades iguales de materia y antimateria; ahora bien, durante los primeros instantes subsiguientes a la gran explosión inicial (el "big bang"), mientras el universo permanecía en un estado de energía extremadamente alta, los procesos que alteran el número bariónico podían haber cambiado el balance.

Se han dispuesto varios experimentos para investigar la desintegración del protón. En virtud de la gran energía de unificación, la vida media del protón se prolongaría por 10^{30} años o más. Para conseguir una probabilidad razonable de observar una sola desintegración, habría que controlar un número ingente de protones. De ahí que una característica distintiva de los experimentos de desintegración del protón haya sido su gran escala. De cuantos experimentos se han preparado hasta ahora, el más ambicioso se realiza en un tanque de agua purificada de 21 metros de lado, rodeado de instrumentos, en la mina de sal de Morton, cerca de Cleveland. A lo largo de casi tres años de control, no se ha visto la desintegración de ninguno de los más de 10^{33} protones del agua, lo que sugiere que la vida media del protón es incluso más larga de lo que predice la más sencilla de las teorías unificadas. Sin embargo, en algunas teorías rivales, esa vida media se dilata muchísimo más y hay otras teorías que explican esa desintegración de manera difícil de detectar en los experimentos en marcha. Añádese a ello resultados de otros experimentos que corroboran la idea de la posibilidad de la desintegración real de los protones.

Problemas pendientes

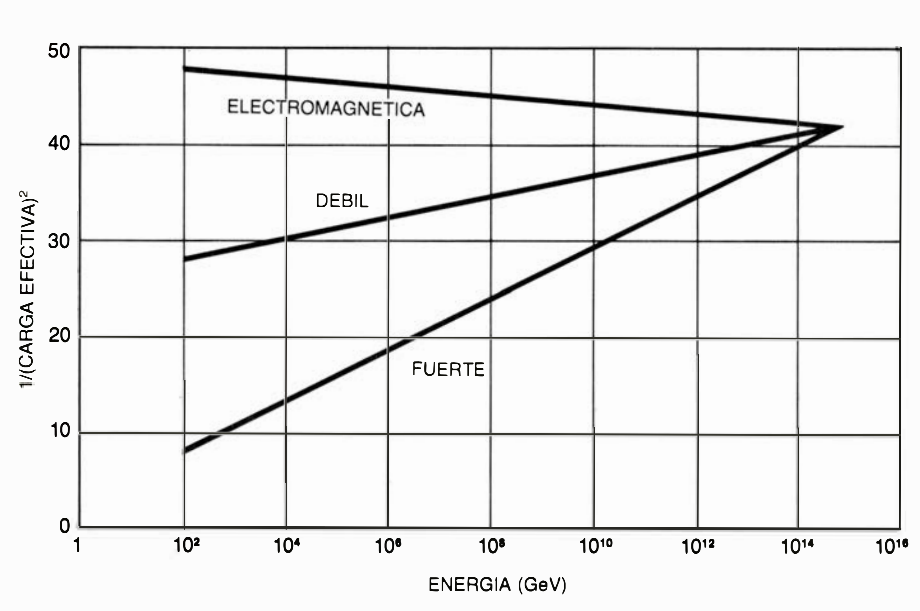
El modelo estándar, formado por la QCD y la teoría electrodébil, a la vez que apunta el camino de una posible unificación, ha sugerido numerosas cuestiones cruciales para los aceleradores presentes y futuros. Entre las muchas metas de las disponibilidades actuales, está el esfuerzo para comprobar las predicciones de la QCD en más detalle. En la próxima década, los aceleradores, con las altas energías necesarias para producir los masivos bosones W y Z^0 en números adecuados, añadirán detalles a la teoría electrodébil. Sería atrevido decir que estas investigaciones no darán sorpresas. El rigor teórico y el éxito experimental del modelo estándar a energías corrientes sugieren que, para decidir las posibles cuestiones fundamentales, debemos dar un gran salto hacia adelante en la energía de interacción, a partir de los cientos de GeV (miles de millones de electronvolt) alcanzables en los aceleradores más potentes en construcción.

Aunque el modelo estándar posee una buena articulación teórica, es incompleto, y no le deja a uno satisfecho del todo. El modelo no explica la masa de los quarks y los leptones, ni por qué las transiciones débiles, que normalmente respetan las líneas de familias, las saltan más de una vez. El propio esquema de familias queda por justificar. ¿A qué se debe que haya tres conjuntos ajustados de quarks y leptones? ¿Existirán más?

Para determinar, en su integridad, el modelo estándar, se necesitan veinte o más parámetros, constantes que la teoría no explica. Entre ellos están las intensidades de acoplamiento de las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas, las masas de quarks y leptones, y los parámetros que especifican las interacciones del bosón de Higgs. Además, los constituyentes aparentemente fundamentales y las partículas de fuerza son, por lo menos, 34: 15 quarks (cinco sabores, cada uno en tres colores), seis leptones, el fotón, ocho gluones, tres bosones intermediarios y el postulado bosón de Higgs. En cuanto al criterio de sencillez, el modelo estándar no parece representar un progreso sobre la antigua visión de la materia como formada de tierra, aire, fuego y agua, interaccionando a través de amor y guerra. Alentados por el precedente histórico, muchos físicos explican la diversidad proponiendo que estas partículas, aparentemente fundamentales, están formadas por combinación de partículas menores.

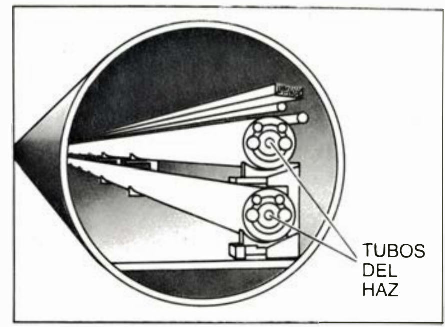
Hay otros dos puntos cruciales donde el modelo estándar parece vacilar. Ni las respectivas teorías de las interacciones fuertes y electrodébiles, ni la conjeturada unificación de las dos tienen en cuenta la gravitación. Saber si la gravitación puede describirse como una teoría cuántica y unificarse con las otras fuerzas fundamentales sigue siendo un problema abierto. Otra deficiencia básica del modelo estándar concierne al bosón de Higgs. La teoría electrodébil exige que el bosón de Higgs exista, pero no precisa cómo debe interaccionar con las otras partículas, ni tan sólo ser su masa; se ocupa de ello de una manera muy vaga.

¿Qué energía debemos alcanzar, y qué nuevos instrumentos necesitamos,



10. CONVERGENCIA DE LAS FUERZAS a energías extremadamente altas, equivalentes a escalas de distancia muy pequeñas, como se espera en las teorías unificadas. La gráfica representa una medida inversa de la intensidad intrínseca de las fuerzas; la de las fuerzas fuerte y débil disminuye con la energía, mientras que la de la electromagnética aumenta. La teoría unificada más sencilla predice que la identidad fundamental de las tres fuerzas se pone de manifiesto a interacciones que tengan lugar a una energía por encima de los 10^{15} GeV, lo que corresponde a una distancia de menos de 10^{-29} centímetros.





11. ACELERADOR proyectado: el Supercolisionador superconductor. Permitirá estudiar interacciones a energías de más de 1 TeV. En el diseño aquí representado (uno más), el anillo acelerador mide 30 kilómetros de diámetro y está enterrado a 100 metros bajo el nivel del suelo; anillos más pequeños alimentan de protones al anillo mayor. Una sección del túnel principal (*arriba*) muestra los dos tubos, cada uno de unos cinco centímetros de diámetro, que contendrán los haces de protones girando en direcciones opuestas. Imanes superconductores, superenfriados con helio líquido para incrementar su potencia y eficacia, envuelven los distintos tubos, focalizando y confinando los haces.

para esclarecer esos problemas fundamentales? Las cuestiones en torno al bosón de Higgs, aunque no son los únicos retos planteados, tienen sus términos bien definidos; las respuestas que reciban influirán en toda la estrategia de la unificación. Establecen un objetivo útil para la próxima generación de máquinas.

Supercolisionador superconductor

Para algunos, el bosón de Higgs no sería, en absoluto, ninguna partícula elemental, sino un objeto compuesto, formado por otros constituyentes, análogos a los quarks y leptones, pero sujetos a una nueva clase de interacción fuerte, llamada a menudo *tecnicolor*, que los confinaría dentro de unos 10^{-17} centímetros. Los fenómenos que revelarían tal interacción serían visibles a energías próximas a 1 TeV (billón de electronvolt). Una segunda aproximación al problema de la masa y el comportamiento del bosón de Higgs postula un principio conocido como *supersimetría*, que relaciona partículas que tienen distinto espín. La supersimetría implica la existencia de un conjunto completamente nuevo de partículas, difíciles de encontrar y dotadas de una masa extrema. Las nuevas partículas se corresponderían con los quarks, leptones y bosones conocidos, pero diferirían en sus espines. En razón de su masa, tales partículas se manifestarían sólo en interacciones que tuvieran lugar a muy alta energía, en torno quizás a 1 TeV.

Para producir interacciones entre partículas fundamentales a energías de 1 TeV hemos depositado nuestra esperanza en el Supercolisionador superconductor (SSC). Formalmente recomendado al Departamento estadounidense de Energía, en 1983, por la Junta Asesora de Física de Altas Energías, este acelerador incorporaría tecnología comprobada en una escala sin precedentes. Se han creado varios proyectos; todos contemplan un colisionador protón-protón o protón-antiprotón. Con la tecnología actual, los haces de protones de alta energía se producen más fácilmente que los haces de electrones y positrones, aunque las colisiones electrón-positrón se ofrecen mejor al análisis; como los protones son partículas compuestas, sus colisiones proporcionan una variedad de interacciones mayor que las colisiones de electrones y positrones. Otra característica común de los proyectos es el uso de imanes superconductores, utilizados por primera vez en gran escala en el colisionador Tevatrón del Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi (Fermilab), en Batavia, Illinois. El diseño aumenta la intensidad del campo y baja el consumo de potencia de los imanes que curvan y confinan el haz.

Un proyecto muy sólido incorpora imanes de aleación niobio-titanio enfriada a 4,6 grados Celsius sobre el cero absoluto. Si los imanes generaran campos de cinco teslas (100.000 veces la intensidad del campo magnético terrestre), en un anillo de una treintena de kilómetros de diámetro se confinarían dos haces de protones girando en direcciones opuestas, acelerados a energías de 20 TeV (necesarios para producir 1 TeV en las interacciones de quarks y gluones dentro de los protones). En otros diseños, en los que sólo los arrollamientos, y no los imanes propiamente dichos, se superenfrían, los campos magnéticos son menores y el dispositivo propuesto es, en consecuencia, mayor.

Se espera que el aparato funcione en 1994, con un coste de 3.000 millones de dólares. El Departamento de Energía que ha apoyado la creación de un gabinete central de proyectos para que diseñe un plan concreto de construcción en los próximos tres años, subvenciona hoy el desarrollo de imanes para el SSC en diversos laboratorios.

El SSC pertenece al ámbido de la investigación básica, con un coste sin precedentes y de unas proporciones inconmensurables. A buen seguro tendrá su recompensa proporcional. Los avances de la última década nos han colocado en el umbral de un conocimiento, radicalmente nuevo, de los constituyentes fundamentales de la naturaleza y sus interacciones. La teoría actual sugiere que la frontera de nuestra ignorancia está a energías del orden de 1 TeV. Sean cuales fueren las claves relativas a la unificación de las fuerzas de la naturaleza y los constituyentes de la materia que trasciendan esa frontera, en el Supercolisionador Superconductor podría estar su revelación.

Compartimentalización de la podredumbre en los árboles

Los animales se curan, los árboles se compartimentalizan. Resisten una vida entera de heridas e infecciones estableciendo fronteras que se oponen a la expansión de los microorganismos invasores

Alex L. Shigo

Los árboles poseen un récord espectacular de supervivencia. Tras más de 400 millones de años de evolución, constituyen los organismos vivos más altos, más imponentes y de más larga vida que jamás habitaron la tierra. A pesar de ello, carecen de un medio de defensa del que están dotados todos los animales: los árboles no pueden huir de las fuerzas destructivas. A causa de su inmovilidad, a lo largo de la historia han sido heridos por todo tipo de enemigos, vivos o no (fuegos, tormentas, microorganismos, insectos, otros animales y, por último, el hombre). Los árboles han sobrevivido porque, en su evolución, se han hecho organismos altamente compartimentalizados; esto es, cercan la madera herida o infectada.

En este aspecto, los árboles difieren radicalmente de los animales. Básicamente, los animales sanan: conservan la vida haciendo millones de reparaciones, instalando nuevas células o células rejuvenecidas en sustitución de las viejas. Los árboles no pueden sanar, no reparan. En su lugar, se defienden de las consecuencias de la herida o infección cercando el daño. En una palabra, compartimentalizan. Al mismo tiempo, disponen nuevas células en nuevas posiciones. Cada año crece un nuevo árbol sobre el árbol viejo. Los resultados más obvios del proceso son los anillos de crecimiento, visibles en cualquier corte transversal de un tronco, raíz o rama.

Las defensas manejadas por los árboles sugieren una nueva visión de su biología, en la cual tiene un reconocimiento pleno el papel de la patología forestal. Los árboles han sido guiados a través de la evolución por su necesidad de defenderse contra los ataques permaneciendo firmes en su sitio.

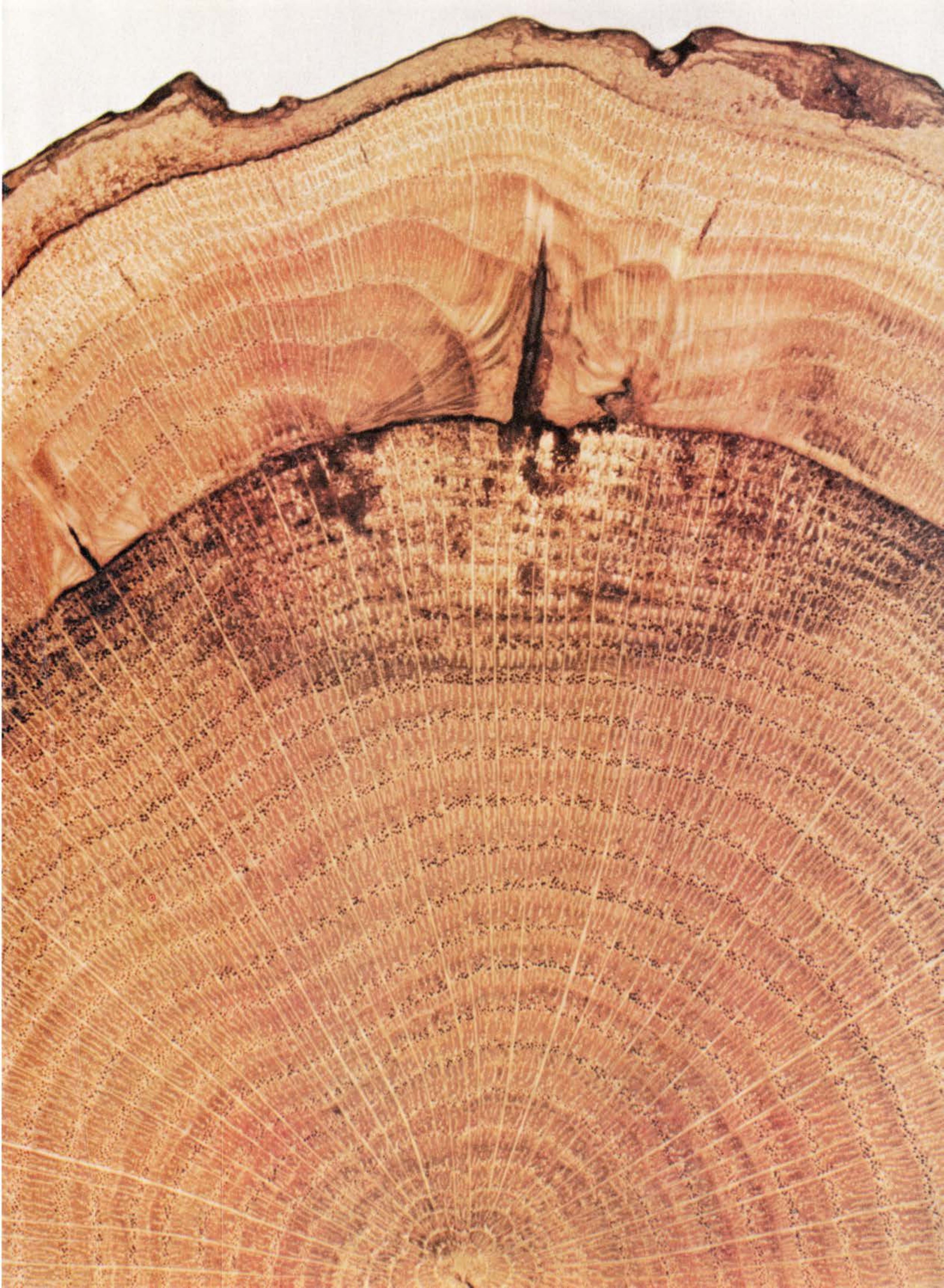
Para comprender la enfermedad y pudrimiento de los árboles es esencial entender su función y crecimiento normales. Los árboles, junto con las hierbas y algas, son los mayores captadores de energía de la tierra. En particular, los bosques, que cubren una décima parte de la superficie del planeta, captan cerca de la mitad de toda la energía que entra en la biosfera. La energía que entra como radiación solar sirve para transformar el dióxido de carbono y el agua en hidratos de carbono, la forma química en que se almacena la energía. A su vez, los hidratos de carbono impulsan el crecimiento, el sustento, la reproducción y la defensa.

Los propios árboles –esto es, las coníferas y los árboles maderables (gimnospermas y angiospermas)– son perennes, leñosos, compartimentalizados y desgajables. Además, la mayoría de los árboles son de vida larga, grandes y altos. Su estructura interna sigue un modelo característico. La generación de nuevas células en el árbol es función del cambium vascular, una delgada capa cilíndrica que se encuentra en el tronco, las raíces y las ramas. Hacia fuera, el cambium deposita el floema, o líber, la capa que transporta líquidos descendentes. (Lleva específicamente sustancias producidas en las hojas por la fotosíntesis.) El cambium deposita hacia dentro capas concéntricas de xilema, que transporta hacia arriba agua y sustancias hidrosolubles.

Merece la pena examinar más de cerca la producción de células hacia el interior. En gran escala, el cambium deposita una capa interna cada año: esos son los anillos anuales de crecimiento, claramente visibles en sección transversal del árbol (salvo en árboles tropicales). Visto en una escala más fina, el cambium forma dos tipos de células básicas: las que tienen el eje mayor perpendicular al eje del tronco, raíz o rama, y aquellas otras con su eje mayor paralelo al eje del tronco, raíz o rama. Las células perpendiculares serán los radios del parénquima, que forma tabiques radiales en la madera, mientras que las células longitudinales rellenarán los compartimentos entre los radios.

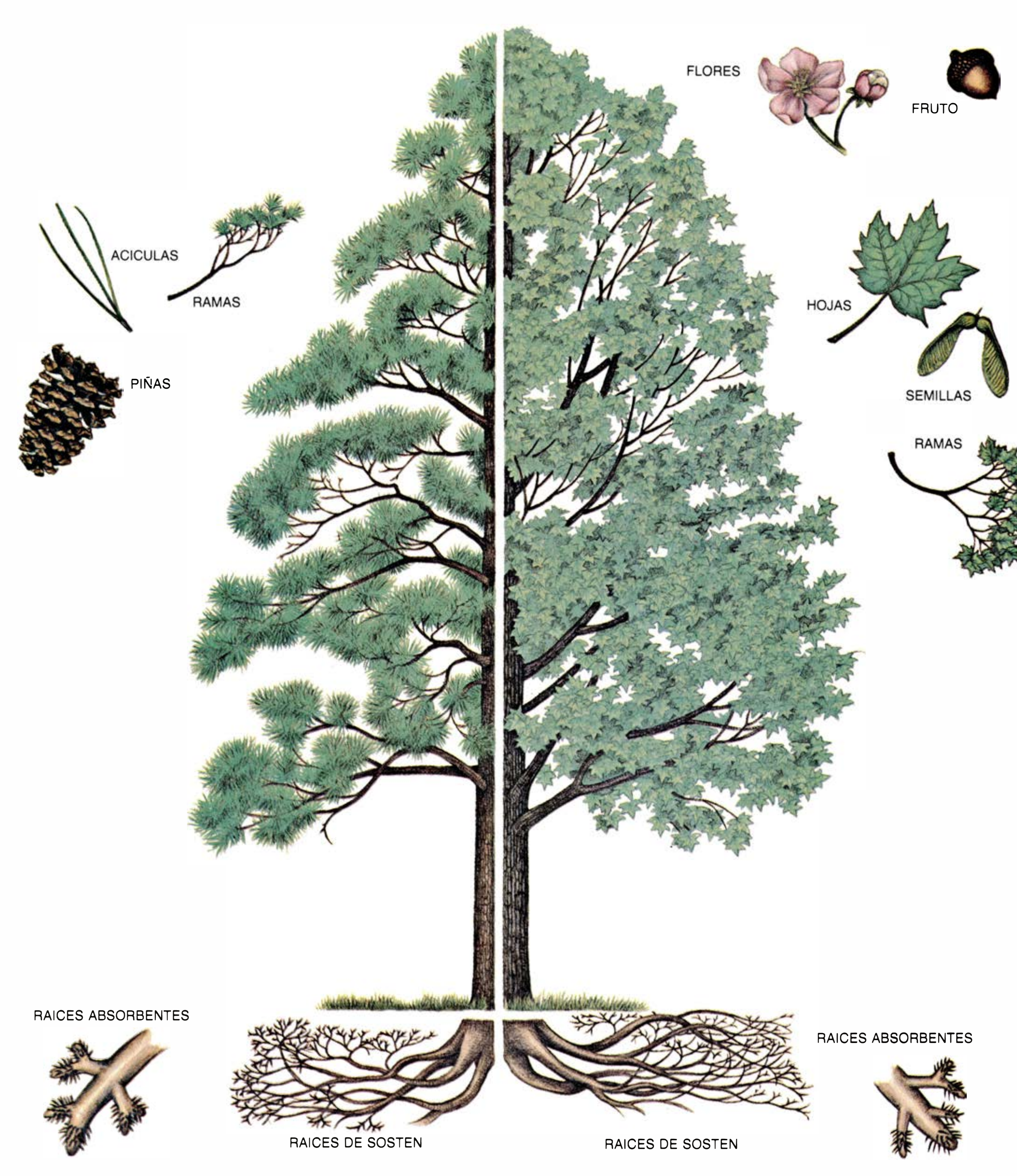
Las células longitudinales son de tres tipos. En algunas el contenido vivo muere a los pocos días o semanas, quedando de ellas sólo una pared celular tubular. En angiospermas, tales células se denominan vasos; en coníferas se denominan traqueidas. Sirven para transportar líquidos. En otras, la pared celular es gruesa. Estas, llamadas fibras celulares o fibras traqueidales, proporcionan soporte mecánico a la madera. Finalmente, las células denominadas parénquima retienen su contenido vivo dentro de una pared celular delgada. (Por el contrario, vasos y traqueidas poseen el interior vacío, rodeado de una gruesa pared celular.) Las células parenquimáticas almacenan nutrientes

1. MEDIDAS DEFENSIVAS de los árboles frente a heridas e infecciones. Se aprecian en este corte transversal del tronco de un roble rojo. Nueve años antes de practicarse la tala, el árbol fue herido por un disparo. Los microorganismos que se establecieron en la herida causaron la podredumbre de la madera, tornándola más blanca que en otras zonas. En su respuesta, el árbol montó una defensa química: el límite oscuro de madera descolorida que rodea la podredumbre indica la producción de sustancias antimicrobianas. La línea oscura que rodea la madera herida es una defensa posterior: el cambium, o capa de crecimiento vivo a los lados de la herida, produjo una pared de células que proteje la madera que se formó después de producirse la lesión. La pauta de anillos de crecimiento exteriores a la herida revela la posterior historia del árbol. A los cinco años la herida se cerró; luego se formaron otros cuatro anillos de crecimiento. El árbol lo cortó el autor y lo fotografió K. R. Dudzik, del Servicio Forestal de EE.UU.



y otros materiales. En ellas, el citoplasma puede mantenerse vivo durante años, a veces más de un siglo. La compleja trabazón de las distintas células en la madera se combina con la rigidez propia de las paredes celulares para conferir al tejido leñoso su fortaleza. El entrelazamiento se continúa en la construcción molecular de las paredes celulares, e incluso en las moléculas de las paredes celulares: celulosa y lignina.

En cualquier momento de la vida de un árbol las capas de madera más reciente, aquellas en que el parénquima aún retiene su contenido vivo, forman la albura del árbol. En muchos árboles, las capas más viejas, las más próximas al eje del árbol, forman un distrito denominado duramen, que con frecuencia presenta un color más oscuro. Parte de la oscuridad deriva de la deposición

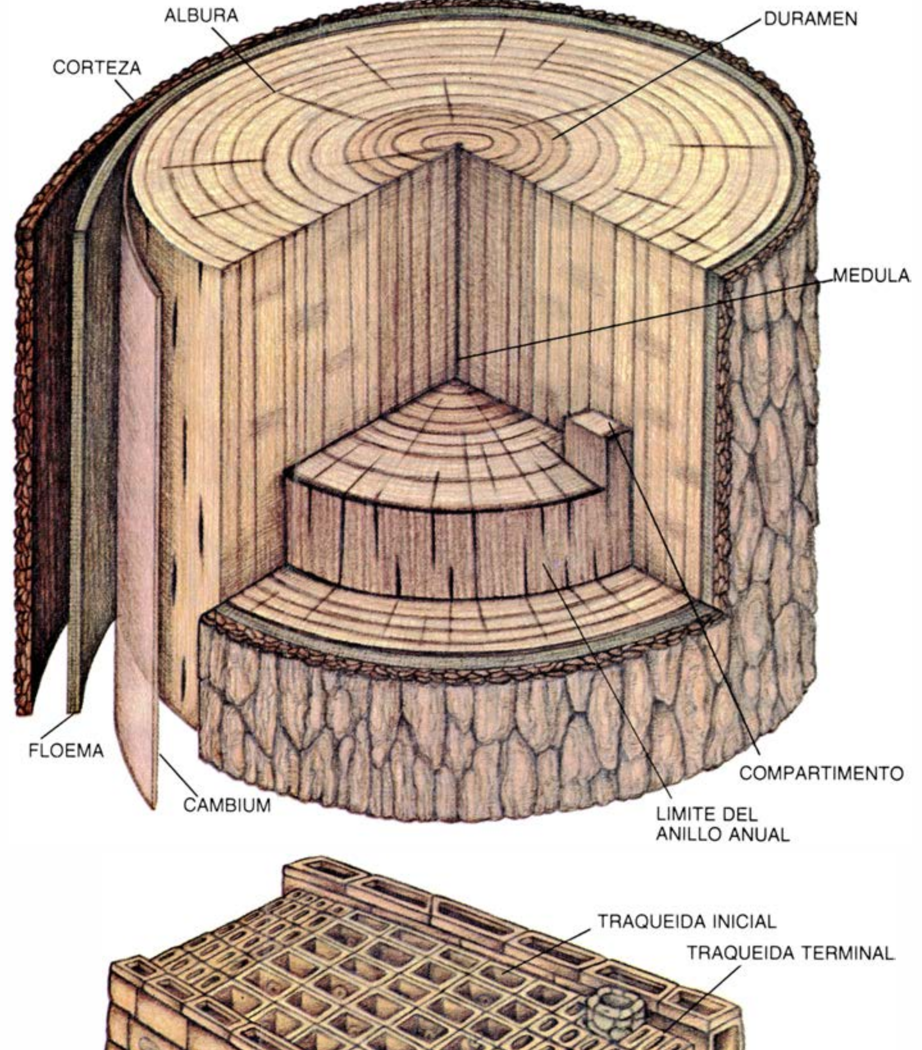


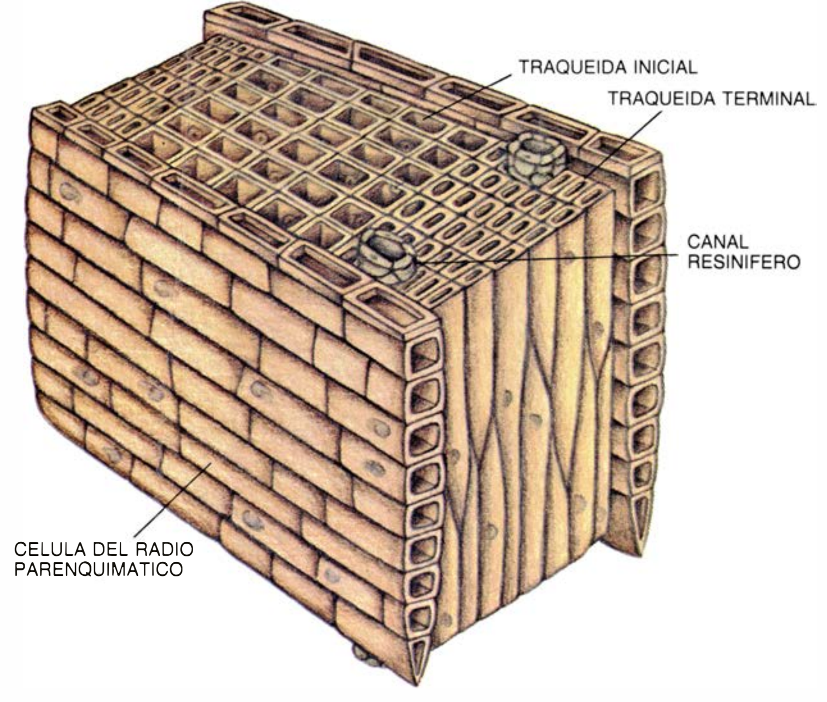
2. ESTABLECIENDO COMPARTIMENTOS logran los árboles resistir la extensión de la infección tras una herida; también les permiten éstos aislar partes de sí mismos cuando las porciones alcanzan una etapa de la senescencia programada genéticamente. A la izquierda se muestra un árbol compuesto. La parte izquierda de la composición es un pino, una conífera típica; la parte derecha es un arce azucarero, ejemplar típico de angiosperma. Ciertos compartimentos, mostrados en el dibujo, se desprenden cuando completan su función. En la parte superior derecha, el tronco del pino aparece en sección

de sustancias conocidas por el término colectivo de extractos. El duramen muestra un alto grado de autosoporte mecánico y continúa prestando servicio al árbol. Por el contrario, no tiene capacidad de almacenar nutrientes ni de transportar sustancias.

El estudio de la anatomía de los árboles sugiere varias interpretaciones conceptuales de esos vegetales. Primero, los árboles son generadores de tejido. En esencia, la germinación de una semilla constituye la activación de un generador celular. Tiene capacidad de proliferación celular, pero siempre en nuevas ubicaciones; el árbol no está dotado para restaurar o regenerar tejidos ya existentes. El generador es el cambium. Segundo, la madera es una estructura altamente ordenada de diferentes tipos de células en diferentes etapas de envejecimiento. Tercero, un árbol constituye una jerarquía de compartimentos. En el tronco, raíces y ramas, los mayores compartimentos son los anillos anuales. A continuación, los grupos de células de cada anillo, compartimentalizados por radios, y luego las células individuales.

El estudio de la respuesta de los árboles a la herida o infección sugiere un nuevo enfoque. Los árboles responden por compartimentalización, intentan cercar la región herida o infectada, pues no matan ni detienen la actividad de los microorganismos en los compartimentos en que los cercan. No responden de forma específica frente a microorganismos específicos; la compartimentalización responde a la herida.

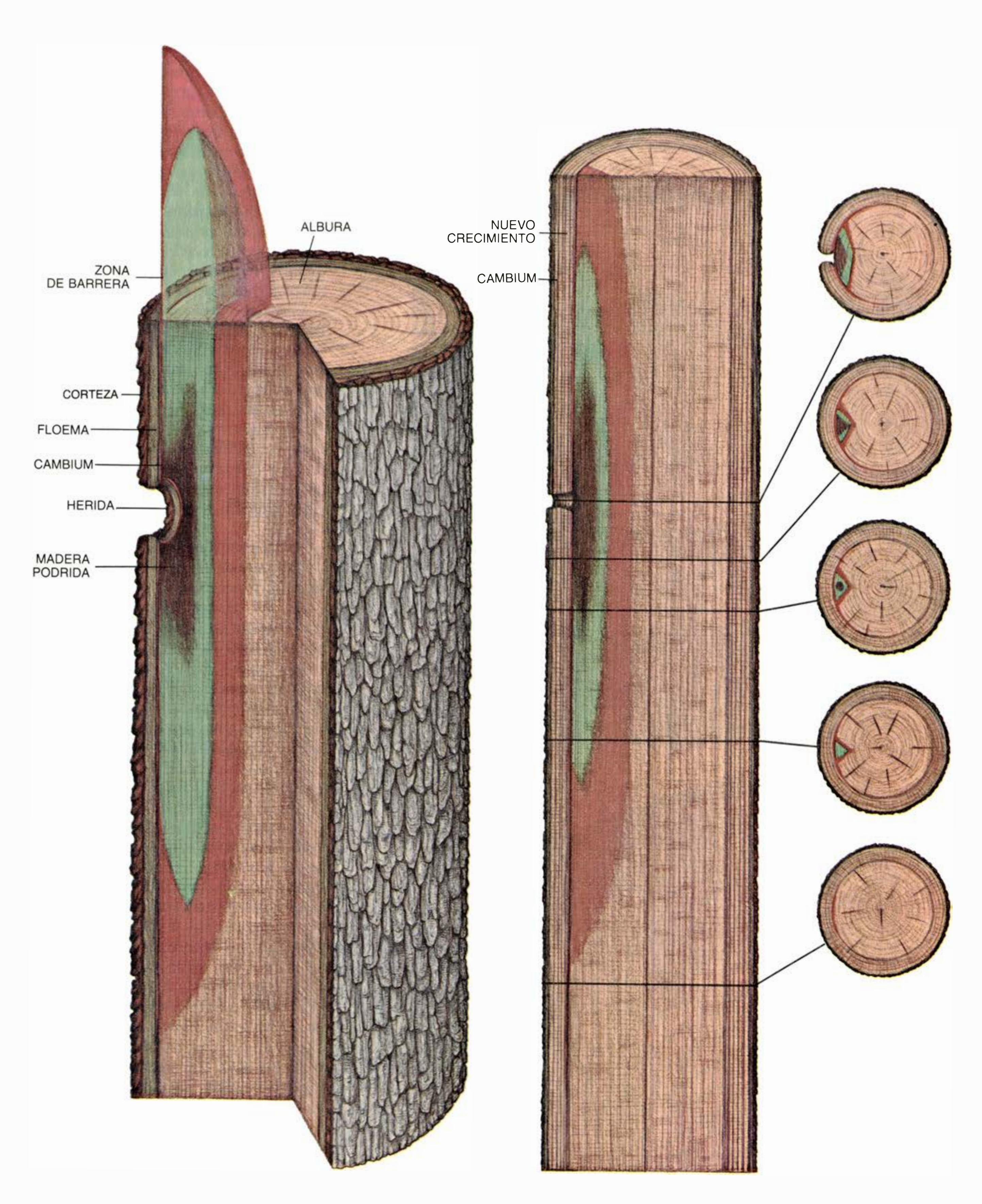




transversal, revelándose más compartimentos. El cambium genera el floema, o líber, y el xilema, la madera propiamente dicha, que compartimentalizan los anillos anuales; a su vez, los anillos están compartimentalizados por radios parenquimáticos. En el compartimento de madera mostrado abajo se distinguen el parénquima, o células de almacenamiento, traqueidas, o vasos celulares, y la madera tardía.

En términos generales, el árbol responde de tres formas frente a heridas e infecciones. En la primera de ellas, los límites del compartimento preexistente se fortalecen para resistir la extensión de la destrucción. La mayor parte del fortalecimiento se logra por medios químicos. En la albura, el metabolismo de las células vivas del parénquima cambia de tal forma que altera el contenido de las células. En el duramen tienen lugar reacciones enzimáticas, cuando, por lo demás, ese tejido ya no está vivo.

Poco se sabe de los detalles; sí, que, bajo circunstancias normales, las células de la madera dedican sus vías metabólicas al almacenamiento de energía química en forma de hidratos de carbono. Normalmente, las moléculas se hallan en forma reducida; su contenido de electrones es relativamente grande. Dañada la madera, la actividad bioquímica de las células que rodean la herida se desvía hacia nuevas rutas metabólicas, con lo que las moléculas tienden a oxidarse, esto es, captan protones o iones hidrógeno. En sentido amplio, el contenido celular sufre un proceso químico muy parecido al curtido del cuero. Así, aparecen diversas moléculas, como ácido gálico o ácido tánico. Suelen ser ricas en fenoles (anillos de seis carbonos con grupos hidroxilo, u OH). Los fenoles ocupan el interior de las células e impregnan las paredes celulares; colorean la madera en tonos rojos, verdes o azules, dependiendo de los detalles de las rutas metabólicas que los



3. RESPUESTA A LA HERIDA, que puede adoptar dos formas: el fortalecimiento de compartimentos existentes y la creación de una pared que proteja el cambium. El tronco de arce seccionado a la izquierda muestra una herida infectada. Una sucesión de microorganismos (*verde*) se ha establecido en la albura (las capas de madera viva bajo el cambium); en el centro de la infección la madera se va pudriendo (*marrón*). En los bordes de la infección las células parenquimáticas producen sustancias antimicrobianas (*rojo*), de tal forma que las paredes preexistentes en el árbol se refuerzan contra la infección. Además, los vasos celulares situados por encima y por debajo de la infección se obstruyen. (En algunos árboles el hinchamiento de las células parenquimáticas constriñe los vasos.) El tronco de la derecha muestra el árbol en la siguiente estación de crecimiento. La pared creada por el cambium ha protegido el nuevo crecimiento, y las defensas internas han compartimentalizado la infección. (Los dibujos del artículo son de Patricia J. Wynne.)

producen, que están determinadas genéticamente para cada especie de árbol. Los compuestos fenólicos, y ello resulta de la mayor importancia para la defensa del árbol, suelen ser antimicrobianos.

En la segunda respuesta que el árbol adopta frente a la herida o infección, crea una nueva pared, valiéndose de medios anatómicos y químicos. Primero, el cambium altera el modelo mediante el cual genera nuevas células. A causa de la herida, se producen pocas células tubulares. También se promueven en menor cantidad células fibrosas. Por otra parte, las células del parénquima, que retienen su contenido vivo, se producen en cantidades crecientes. Ahora, sin embargo, son menores y su actividad metabólica está alterada, de suerte que su contenido químico resista a los microorganismos. La nueva pared, o barrera de la zona, explica muchos de los defectos encontrados en productos de madera. Por ejemplo, puede ocasionar que la madera de un árbol se separe a lo largo de un círculo; tal defecto se conoce como grieta anular.

La tercera respuesta que adoptan los árboles es continuar creciendo. Los árboles sobreviven a la herida e infección si tienen bastante tiempo, energía y capacidad genética para reconocer y compartimentalizar el tejido herido o infectado mientras generan nuevo tejido, que mantendrá la vida del árbol. En cierto modo, un árbol herido o infectado se parece bastante a un buque muy compartimentalizado o a un submarino antiguo. Cuando un torpedo alcanza un buque, la tripulación se apresura a aislar el área dañada. Cuanto más rápida sea la acción de la tripulación y más fuertes las paredes que circunscriben el compartimento dañado, menor será la extensión del daño. Sin embargo, una vez contenido el daño, el compartimento o compartimentos dañados ya no son accesibles. Aquí termina la analogía. El árbol sobrevive creciendo sobre sí mismo, lo que se traduce en un nuevo árbol (con un nuevo juego de compartimentos) en la siguiente estación de crecimiento.

Debe señalarse que las zonas de reacción del árbol (sus límites reforzados químicamente) no son absolutos: pueden alejarse de la infección, con mayor o menor rapidez, a medida que ciertos microorganismos superan la defensa química. Por otra parte, los fenoles no sólo son venenosos para los microorganismos, sino también para el árbol. En efecto, el árbol se envenena en parte en su intento de obstaculizar una invasión. El árbol sobrevive porque, al mismo tiempo que fortalece las defensas, crea un árbol nuevo.

Es digno de destacar que la capacidad de un árbol para desprenderse de partes de sí mismo es muy parecida a la respuesta que el árbol adopta frente a la herida e infección. Es decir, desprenderse de algo constituye un aspecto de la compartimentalización. En particular, se separan del árbol las acículas, hojas, estructuras reproductoras y raíces absorbentes que hayan satisfecho su programa genético. (Raíces absorbentes son las raíces finas, no leñosas, que absorben sustancias del suelo.) Los renuevos, ramas y raíces grandes pueden también aislarse o separarse, por ejemplo en el inicio de una herida o infección, o después de que el renuevo, rama o raíz alcancen una etapa particular de la senescencia. (Es difícil establecer en qué etapa: se sabe muy poco de la programación genética del envejecimiento en los árboles.) Todo lo dicho requiere una aclaración; los árboles no se despojan activamente de partes de sí mismos. El viento, la nieve, el hielo, los animales y otros agentes son la causa de que las partes aisladas se desprendan del árbol, mientras que las raíces absorbentes desgajadas las digieren los microorganismos del suelo.

Vuelvo ahora a la otra parte de la contienda entre el árbol y sus enemigos. Comenzaré con la herida de un árbol, supongamos que causada por un animal. La herida proporciona espacio y nutrientes para gran variedad de organismos invasores, insectos, nematodos, bacterias y hongos incluidos. Mientras éstos compiten entre sí por el nuevo espacio y nutrientes, las células vivas de la albura subyacente a la herida reaccionan a la invasión experimentando una serie de cambios bioquímicos que llevan a la producción de defensas químicas fenólicas.

Los microorganismos atacan las heridas del árbol de diversas maneras. Ciertas bacterias y hongos infectan el floema, y en él se mantienen, provocando enfermedades conocidas como cánceres anuales. Otros microorganismos invaden las heridas y permanecen en la albura herida, creando las llamadas podredumbres de herida. Por repetición anual de este proceso crean cánceres permanentes. Finalmente, algunos microorganismos atacan la herida infectando la albura y luego la corteza interior. Ese proceso se repite nuevamente en cada estación de crecimiento; se trata de los llamados hongos del cáncer de la podredumbre. Son notablemente engañosos. Cuando el cáncer de podredumbre ha prosperado desde la madera a la corteza, forma una coraza dura de material, parecida a una cuña, que mata el cambium subyacente. El árbol responde reactivando sus defensas de compartimentalización. El hongo, a su vez, invade la nueva herida, desde la que crea otra coraza. La actividad oscilante puede persistir hasta que se circunde todo el árbol.

Los primeros microorganismos que tienen éxito en la invasión de un árbol se denominan pioneros. Quizá sólo logren tolerar las alteraciones químicas desencadenadas en la madera del árbol por la herida. En algunos casos, sin embargo, su constitución genética los hace capaces de digerir las defensas químicas. Normalmente, pero no siempre, los pioneros son bacterias, junto con algunas especies de hongos. Entre los últimos cabe destacar los himenomicetos, que causan podredumbre en árboles, y los hongos imperfectos y ascomicetos, que en su mayoría no causan podredumbre por sí mismos.

Un punto crucial en la infección es que los microorganismos se establecen siguiendo cierta secuencia. Cuando el microorganismo pionero sobrepasa los compuestos inhibidores, allana el camino a otros invasores, aquellos que habrían sucumbido a las defensas del árbol. De esta forma, la invasión es una sucesión de organismos, con un modelo esencial para la supervivencia de los invasores. Sin duda, ningún microorganismo "come veneno" para ayudar a su sucesor. Cada organismo actúa de forma que favorece su retención de espacio y energía; de ahí que algunos pioneros generen, o conserven, condiciones que inhiben la infección por parte de hongos agresivos de la podredumbre de la madera. Esos pioneros quizá sirvan, en última instancia, para establecer las bases del control biológico de la podredumbre en los árboles. Estudios de ciertos hongos, como especies de *Trichoderma*, demuestran que el hongo prospera en albura alterada por la herida, pero no detoxifica los compuestos que impiden la entrada de los hongos causantes de la podredumbre.

Supóngase que una sucesión de microorganismos invasores logra digerir la albura alterada por la herida. Su éxito no necesariamente sentencia al árbol. Por una razón: el árbol genera nuevas células alrededor de las viejas. Si el árbol aporta nuevas células más aprisa de lo que se digieren las viejas, sus posibilidades de sobrevivir serán

considerables. La muerte del árbol, si ocurre, puede ser mecánica o biológica. El árbol morirá si se rompe el tronco. O bien, morirá si se mata el cambium (el generador celular) y, también, si gran parte de su tejido se ha aislado de tal modo a lo largo de una vida de defensa contra las heridas e infecciones, que los compartimentos restantes resulten insuficientes para almacenar las reservas energéticas del árbol.

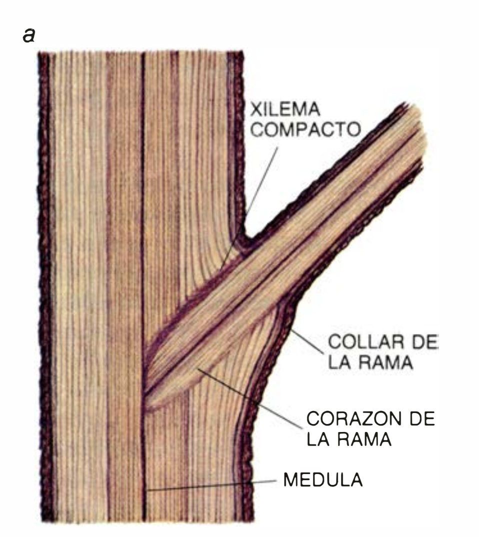
La nueva concepción de los árboles como organismos compartimentalizantes no surgió repentinamente. De hecho, fue el producto de la contradicción entre nociones anteriores, algunas desarrolladas al poco de establecerse, hace un siglo, el esqueleto de la moderna biología. Parece cosa trivial decirlo, pero los árboles son esencialmente diferentes de los animales, y gran parte del fracaso en su comprensión deriva de confundirlos inconscientemente.

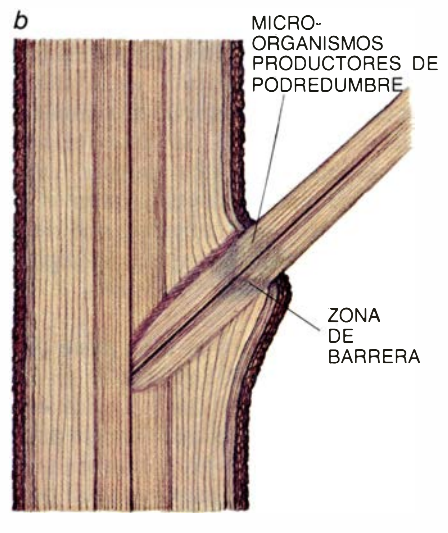
Antes de 1845, la explicación más común de la vida era que se originaba espontáneamente (esto es, por generación espontánea) a partir de materia inorgánica. Se conocían bien los microorganismos; en particular, se había reconocido la asociación entre madera en pudrición y hongos. La idea, sin embargo, era que la pudrición daba lugar a los hongos. En tiempos de Heinrich Anton De Bary, Louis Pasteur y el desarrollo de la teoría del germen, que atribuye la enfermedad a diminutos organismos nocivos, el patólogo forestal alemán Robert Hartig invirtió los términos, proponiendo que los hongos daban lugar a la podredumbre. Hartig mostró que los esporóforos, o cuerpos fructíferos encontrados en heridas de árboles, y los micelios, organismos de tipo filamentoso encontrados en madera en putrefacción, representaban diferentes etapas de la vida del mismo organismo fúngico. La observación, y la inversión de la hipótesis, puso los cimientos de la moderna patología forestal.

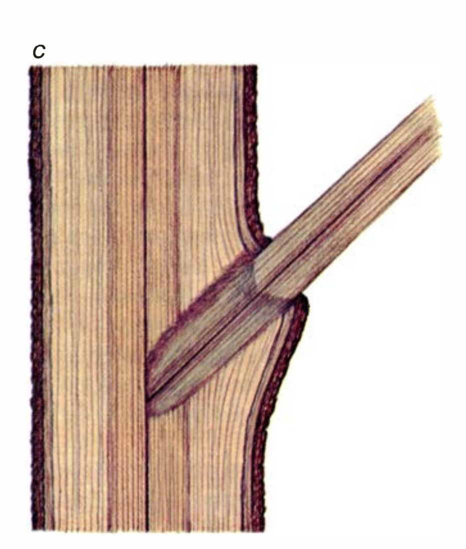
Estudios posteriores de la pudrición fueron obra de investigadores interesados principalmente en el deterioro de la madera, por lo que consistieron, en esencia, en la retirada de madera de los árboles, seguido de investigaciones en el laboratorio acerca de los cambios que sufrían los tejidos. Los estudios se centraron en el duramen o, en todo caso, en madera más oscura que la albura. La estrategia subyacente a estos estudios se fundaba en la naturaleza del duramen, que era tejido muerto e insensible. Hasta cierto punto los estudios tuvieron éxito: químicos y patólogos llegaron a comprender de qué manera los hongos (en particular sus enzimas) digerían la madera. Aún no se consideraban los procesos que se dan en el árbol vivo. Aunque el duramen está muerto, en términos de vida animal, reacciona frente a la herida y la infección. Algunos textos sostienen aún que la podredumbre de los árboles no puede considerarse una enfermedad, pues sólo enferma duramen muerto. La podredumbre constituye, de hecho, la principal enfermedad de los árboles del mundo.

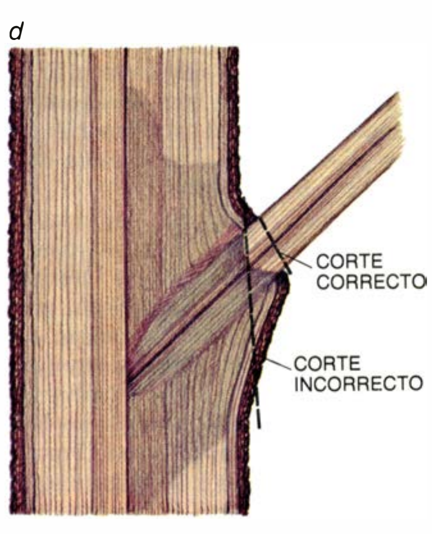
Por esas razones, los primeros investigadores no lograron reconocer las defensas activadas por la herida en infección, que alteran la madera al sufrir el árbol alguna herida. En un árbol vivo, la mayoría de las heridas no produce podredumbre, porque los microorganismos que infectan la herida se enfrentan a madera que ha cambiado. En contraste, los hongos productores de podredumbre que atacan tablones no encaran ninguna fuerza contraria de la madera. Los microorganismos, simplemente, compiten entre ellos.

La disponibilidad de sierras de cadena permitió a los investigadores desarrollar una nueva interpretación de la podredumbre. Hacia la década de 1940, el instrumento tenía ya potencia suficiente para que un individuo solo cortara secciones longitudinales a través de los árboles, exponiendo columnas de madera descolorida y en putrefacción bajo los anillos de crecimiento que el árbol había desarrollado tras la herida. Antes de 1940 se habían disecado árboles, pero la mayoría de los cortes eran transversales. Sólo algunos investigadores más osados, como el patólogo George H. Hepting, trabajando en el delta del Mississippi en la década







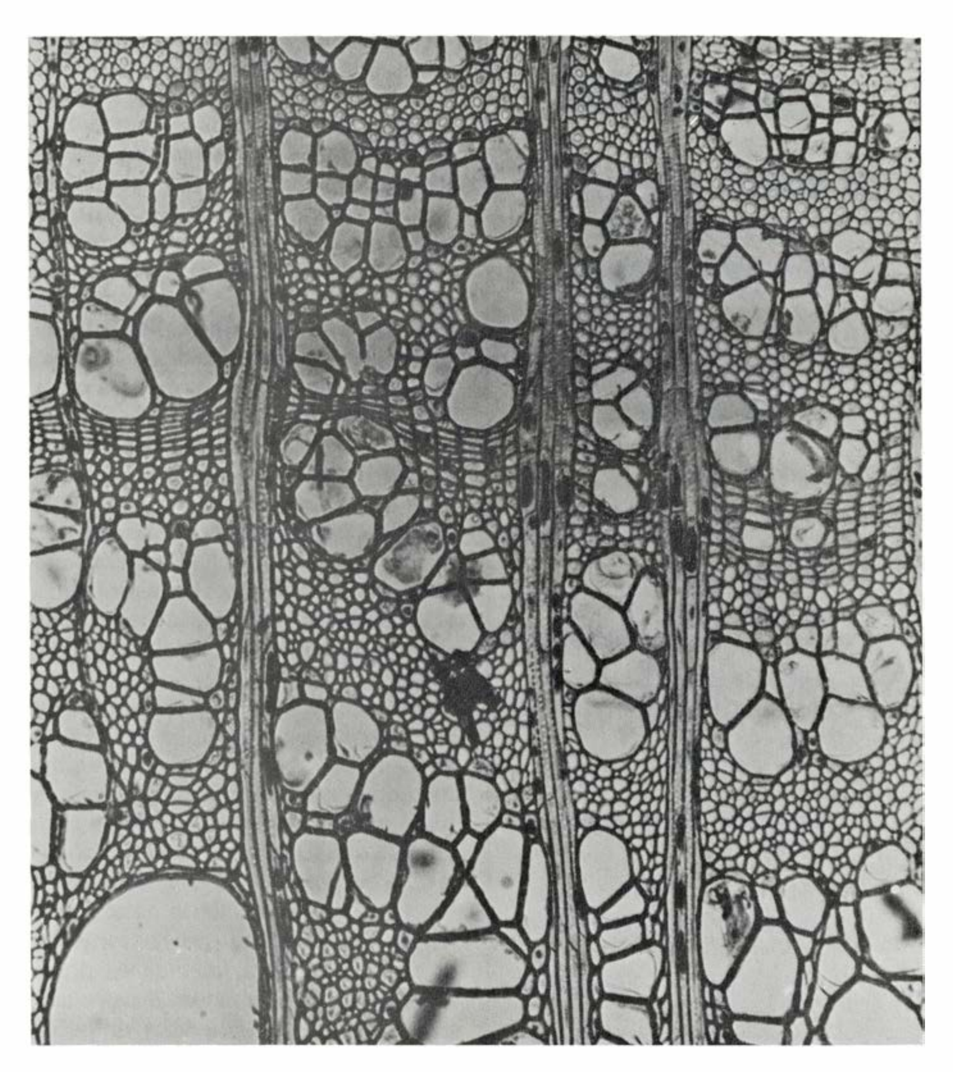


4. MUERTE DE UNA RAMA. Sigue un curso muy parecido a la reacción a la herida o infección de un árbol. La rama viva (*a*) está separada del tronco por una formación externa, llamada cresta de la corteza de la rama, y una partición interior del xilema a lo largo del ángulo de la cresta. La base de la rama se ha denominado collar. Al morir la rama (*b*) la invaden microorganismos productores de podredumbre. El árbol pone en marcha defensas químicas en una zona de protección del collar. La secuencia es esencial para la pérdida de la rama. En la mayoría de los casos la podredumbre se detiene en el collar. A veces, sin embargo, la podredumbre invade el resto de la médula de la rama (*c*). Si la rama muerta se poda de forma inapropiada (*d*) se daña la zona protectora y la albura del tronco queda expuesta a la invasión.

de 1930, procedió de otra manera. Hepting, valiéndose de sierras de través y hachas, logró ver lo que otros vieron más tarde: que, en grandes extensiones, la madera generada tras una herida no estaba invadida por hongos que infectaban la propia herida.

En los años sesenta y setenta yo mismo tuve la oportunidad de seccionar miles de árboles, primero en el nordeste de Estados Unidos y, más tarde, en Europa, India, Puerto Rico y Australia. Me impresionaron, por una parte, los ordenados modelos de coloración y, por otra, la ordenada sucesión de microorganismos invasores. Mis colegas y yo emprendimos entonces experimentos con árboles vivos. Más tarde realizó estudios bioquímicos Walter C. Shortle, colega mío en el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en Durham, New Hampshire.

Con ánimo de definir lo que había en común entre las respuestas que adopta el árbol frente a la herida e infección y dar razón de los modelos de pudrición y de coloración en los árboles heridos, mis colegas y yo ideamos un modelo al que llamamos CODIT (acrónimo inglés de compartimentalización de la podredumbre en árboles). La primera parte del modelo atañe a las respuestas que adopta el árbol en el momento de la herida. En resumen, el árbol refuerza los tabiques que, al menos en gran parte, ya existían en la madera. La pared 1 resiste la extensión vertical de la madera infectada, la pared 2 la extensión hacia el interior y, la pared 3, la extensión lateral. La segunda parte del modelo atañe a la respuesta tardía del árbol. En esencia, el árbol eleva una pared que no existía en el lugar en el momento de la herida: el cambium genera la pared 4, que separa la madera infectada de la madera sana, formada de nuevo.



5. SECCION TRANSVERSAL DE LA ALBURA de un olmo americano con una pared, o zona de barrera, creada por el cambium en respuesta a una herida. En la zona, las células parenquimáticas son más pequeñas, los radios parenquimáticos están hinchados (los radios cruzan el campo de visión) y muchas células de los radios parenquimáticos tienen inclusiones oscuras formadas por sustancias antimicrobianas. Las células, dispersas por la sección transversal, son vasos, el equivalente, en angiospermas, a las traqueidas. La herida que provocó las defensas del árbol fue una infección por el hongo que causa la enfermedad holandesa del olmo. Los olmos reaccionan a la infección microbiana aislando el invasor, con lo que también reducen en parte su capacidad para almacenar compuestos energéticos de reserva.

La pared 1 no tiene existencia real en cuanto entidad anatómica antes de la infección. Se trata, principalmente, de una pared tapón, que se opone a la expansión vertical de la infección por medios anatómicos y químicos. El árbol dispone de tuberías verticales: vasos en angiospermas y traqueidas en coníferas. Al producirse la infección, los vasos deben obstruirse, pues constituyen una vía fácil de expansión para los invasores. Los árboles obstruyen los vasos de diversas formas. Por una parte, las células que rodean los vasos (que forman el llamado parénquima de contacto) se hinchan contra el hueco de los vasos; pueden también desarrollarse incrustaciones en los extremos de los vasos, o llenarse éstos de material granular o cristalino. Asimismo se cierran los poros que quedan entre vasos. A veces se desarrollan burbujas de aire, que impiden el transporte de líquidos. La defensa de la pared es relativamente débil, ya que el árbol no podría vivir si obstruyera todas las cañerías verticales. Además, la expansión vertical de la infección es relativamente poco importante: puede estar infectada toda la médula de un árbol y, sin embargo, mantenerse vivos los nuevos árboles formados por el cambium en años sucesivos.

Las paredes 2 y 3 existen antes de la infección: las forman los anillos anuales, que resisten la expansión interna de la infección, y los rayos parenquimáticos, que resisten la expansión lateral. Tras la infección, las paredes se refuerzan químicamente. Sin embargo, la pared 2 es, en parte, anatómica. En algunos árboles, como el arce (pero no, por ejemplo, el olmo), el final de cada estación de crecimiento está marcado por la producción, por parte del cambium, de una capa final de lo que se llama parénquima marginal, o terminal, en angiospermas y, leño tardío de paredes celulares engrosadas, en coníferas. Las células forman una barrera de albañilería celular en el perímetro de cada anillo de crecimiento. La pared 2 es moderadamente fuerte; la pared 3 es la más fuerte de las tres. Si esta última falla, la podredumbre puede extenderse como un abanico. Esa es la causa de que haya árboles huecos, utilizados como protección y vivienda por muchos animales. El árbol sobrevive, con una copa completa de hojas sanas, gracias al trabajo del cambium en las estaciones de crecimiento subsiguientes a la herida.

La resistencia decisiva a la infección es la resistencia a su difusión exterior,

en particular la defensa del cambium frente a la destrucción que procede del interior del árbol. Aquí entra en juego la pared del cambium. Es muy débil si se considera su contribución a la fortaleza de la estructura del árbol, pero muy fuerte en cuanto que constituye una barrera contra microorganismos, una barrera que aísla el tejido exterior a la herida y, por tanto, formada después de la herida. En realidad, es impermeable a la mayoría de los hongos y bacterias que habitan la madera o corteza. Recientes trabajos de R. B. Pearce, P. J. Holloway y Jill Rutherford, en la Universidad de Oxford, han establecido que las células de esa barrera, la pared 4, están recubiertas de suberina, el ácido graso que da a la corteza su resistencia a los invasores microbianos. (Los invasores casi nunca tienen enzimas capaces de actuar sobre la suberina.)

Mis colegas y yo hemos inventado un instrumento que detecta la madera podrida de los árboles vivos sin necesidad de dañarlos. El instrumento se basa en una característica de la podredumbre: a medida que se pudre la madera, su contenido en portadores de cargas eléctricas (principalmente iones potasio) aumenta, de tal forma que la resistencia eléctrica del tejido, medida en ohms, disminuye. Por esa razón, nuestro aparato consta de un generador de pulsos de corriente, operado por una batería, un sensor y un ohmmímetro. Para medir la podredumbre, se perfora un agujero de dos milímetros de diámetro y de 20 a 30 centímetros de profundidad. Se inserta lentamente el sensor. Una repentina disminución de la resistencia eléctrica detectada en la punta del sensor (la punta carece de aislamiento) indica podredumbre. El instrumento se emplea también para detectar podredumbre en la base de los postes de conducción.

Mis colegas y yo colaboramos con genéticos en el afán de precisar qué individuos, de una misma especie de árboles, tienen la mejor capacidad de compartimentalización (esa capacidad está sometida a un fuerte control genético). Armados con nuestros nuevos conceptos de biología forestal, reexaminamos las enfermedades del árbol. Hemos observado, por ejemplo, que los olmos compartimentalizan la madera infectada por el hongo que causa la enfermedad holandesa del olmo. La defensa puede llevar a la muerte por hambre, pues los tejidos que normalmente almacenan energía quedan aislados. Por otra parte, proyectamos correcciones en muchos de los procedimientos convencionales del cuidado de los árboles, así la poda.

Gran parte de los errores que subyacen en el inapropiado cuidado de los árboles proceden de la aplicación inconsciente, a los árboles, de conceptos desarrollados para explicar la biología animal. En muchos casos se tratan los árboles como si fueran animales o, peor aún, como personas. Se cura a los árboles heridos en el afán de detener la podredumbre y promover la curación casi como un padre venda la herida a un niño. Las cavidades de podredumbre se limpian más allá de la podredumbre hasta alcanzar y sobrepasar la madera sana, al igual que un dentista limpia un diente cariado. Las ramas se podan a ras del tronco y en algunos países se labra en forma de diamante la corteza en la base de la rama; el subsecuente callo, o cicatriz, se considera señal de que el árbol cura bien.

Ninguno de esos tratamientos beneficia al árbol; en realidad, todos ellos pueden ser perjudiciales. No hay datos científicos de que ninguna sustancia aplicada a una herida de un árbol detenga la podredumbre. Las curas son principalmente cosmética. (Quizá también sean medicina psicológica para el dueño del árbol.) La limpieza de una cavidad hasta más allá de la podredumbre, penetrando en la madera sana, promueve más podredumbre. En realidad, es una de las peores cosas que se le pueden hacer a un árbol. La cavidad existe porque el árbol ha aislado la podredumbre. Finalmente, el uso inadecuado de la poda permite a la podredumbre apropiarse de células heridas en el tronco. Alrededor de la base de cada rama hay un hinchamiento conocido como collar. Dentro de él se advierte una zona protectora de la rama, esto es, el lugar donde se establece la defensa química de la rama. El collar no debe herirse, y mucho menos cortarlo, al podar.

La podredumbre de los árboles es un proceso natural. En algunos casos puede regularse: cabe acelerarla, frenarla o detenerla. Cuando no puede actuarse sobre ella, al menos puede detectarse, de forma no destructiva, en árboles vivos. Es más, puede pronosticarse tanto en configuración como en tamaño. Por otra parte, cabe seleccionar los árboles por su resistencia a la dispersión o difusión de la podredumbre. La ciencia forestal se está acercando a una nueva comprensión de los árboles y de cómo logran sobrevivir bajo tantas presiones.

El templo del foro romano de Ampurias

La expansión de la cultura romana por el Mediterráneo fue utilizada como un instrumento de dominio de pueblos menos avanzados. Estudiamos aquí uno de los primeros ejemplos monumentales de esta política, ubicado fuera de Italia

Ricardo Mar y Joaquín Ruiz de Arbulo

A comienzos del siglo VI a.C., un grupo de griegos originarios de la ciudad de Focea, en Asia Menor, vinieron a establecerse en el extremo occidental del Mediterráneo. El lugar elegido fue un promontorio costero al sur del golfo de Rosas, no lejos del Pirineo, en una zona ya frecuentada por mercaderes fenicios y etruscos.

Fundaron un *emporion*, un puerto comercial destinado al tráfico de mercancías importadas. Con el tiempo, este asentamiento llegó a ser una *polis*, una ciudad independiente, que acuñó moneda tomando Emporion como nombre y el caballo Pegaso como símbolo. Durante la segunda guerra púnica fue aliada de Roma y como tal recibió en su rada a las primeras tropas romanas llegadas a la Península. Más tarde, ya en época del imperio, se convirtió en municipio de derecho romano. En la alta Edad Media fue sede condal y episcopal. Luego, por diferentes razones, se fue despoblando lentamente hasta que su nombre cayó en el olvido.

Recuperado durante el Renacimiento el conocimiento de la antigüedad clásica a través principalmente de sus textos, el interés de los eruditos se centró en la ubicación de las viejas ciudades citadas en las fuentes. Y así, en el siglo XV, el cardenal Margarit situó ya correctamente Ampurias frente a la tradición que la relacionaba con el pueblo de Castelló, situado a 20 kilómetros al norte del asentamiento clásico. Eruditos del XVII como Geroni de Pujades o Peyre de Marca continuarían los estudios, pero hubo que esperar al siglo XIX para que Jaubert de Passa y Pella i Forgas publicaran los primeros planos de los restos conservados de la ciudad.

Tras un período de rebuscas y ventas de antigüedades que cubriría todo el siglo XIX, en 1908 comenzaba el trabajo científico. En esta fecha, dentro del amplio programa de renovación cultural que propiciara Prat de la Riba, Puig i Cadafalch, entonces presidente de la Junta de Museos, consiguió de la Diputación de Barcelona medios económicos para la compra de terrenos e inicio de excavaciones sistemáticas. Emilio Gandía, enviado como capataz de los trabajos, emprendió una labor que duraría, con algunas interrupciones, hasta la guerra civil española. Fueron 29 años de trabajos relatados en sus "Diaris d'Excavació" (1908-1937), conservados en el Museo Monográfico de Ampurias. Durante ese tiempo se trabajó esencialmente en el área de la antigua ciudad griega.

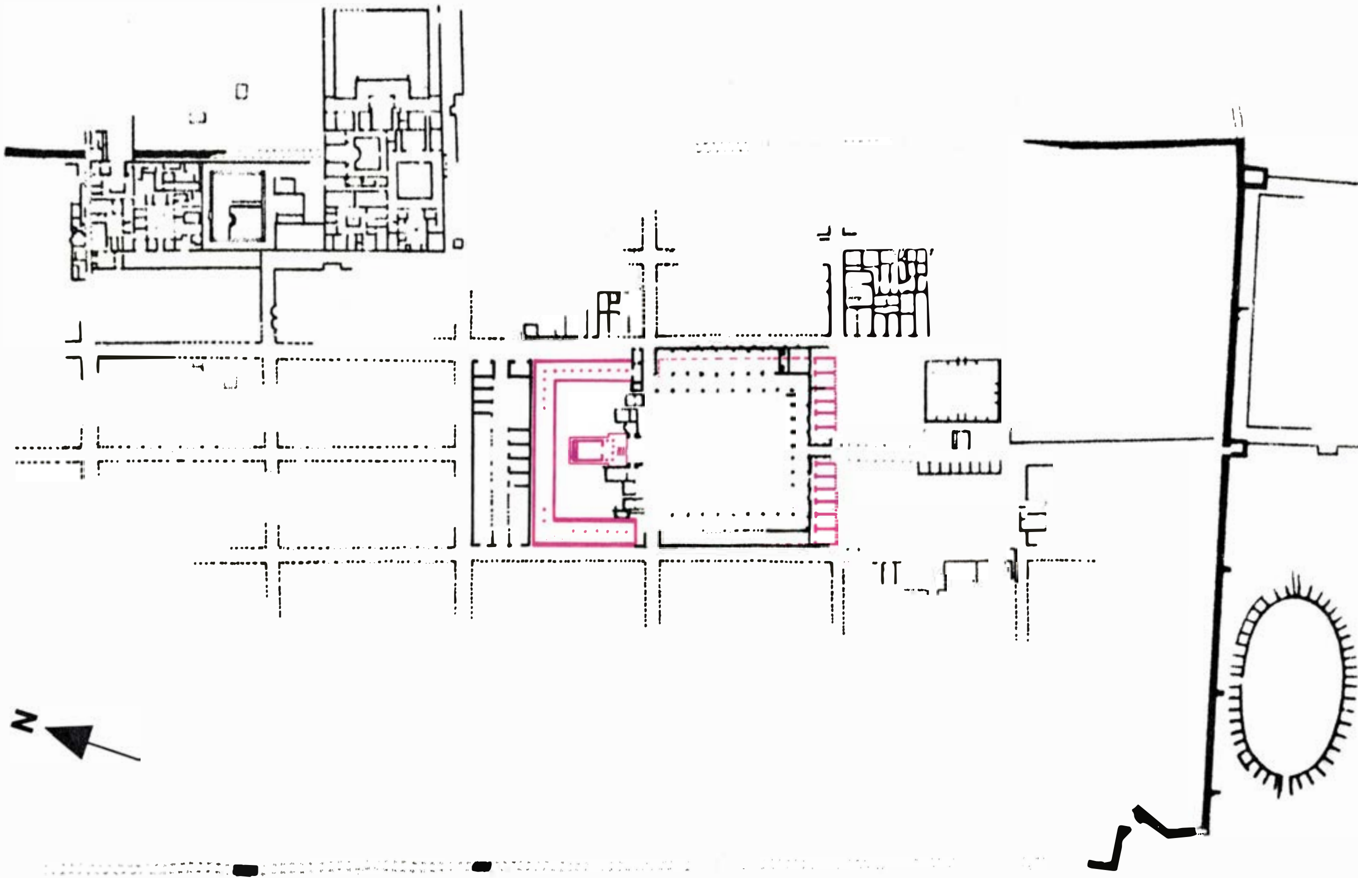
Tras la guerra civil, los trabajos continuaron en la ciudad romana. El foro, identificado por Nino Lamboglia en 1954, no fue objeto de excavación hasta diez años más tarde. Desde 1964 hasta hoy, bajo las sucesivas direcciones de M. Almagro, E. Ripoll y E. Sanmartí se ha insistido en este sector. En 1982, tras una labor de sistematización en el conocimiento arqueológico del foro, nuevas excavaciones han culminado con la identificación de las estructuras que lo formaban y su evolución histórica.

El foro romano heredó las funciones que en época griega asumía el ágora. Se trataba de una plaza pública donde se realizaban las actividades comerciales y se reunía a la población para abordar temas de interés común. Reuniones y comercio debían estar protegidos por las divinidades. Por ello, los templos de los dioses tutelares se situaban junto a la plaza. Con el tiempo, el desarrollo institucional llevó a la creación de estancias específicas de uso administrativo y judicial. Estos elementos, articulados en la misma plaza, configurarán el foro característico de la época imperial: centro político, administrativo, religioso y comercial. Representaba la autonomía y el poder de la ciudad. Sus edificios se beneficiarán con los ornamentos que ricos ciudadanos construirán a sus expensas.

El foro romano de Ampurias se edificó en torno al año 100 a.C., según revela la investigación más reciente, como parte de una ciudad amurallada, de planta ortogonal, construida a partir de un antiguo *praesidium*, una fortaleza de vigilancia establecida por los romanos a raíz de las rebeliones indígenas del año 197 a.C.

Esta nueva ciudad se situó junto a la polis griega, que conservó sus propias fortificaciones y por tanto su independencia jurídica. Recibió una población que aún no conocemos bien. Formaban parte de ella los legionarios que, al licenciarse, se establecieron en el lugar donde habían prestado servicio formando familia con mujeres indígenas. En un proceso más general puede contemplarse cómo a lo largo del siglo II a.C. una progresiva aculturación de los naturales de la península provoca el lento desmembramiento del sistema económico de las tribus iberas y su sustitución por los patrones romanos: la ciudad como centro fiscal, comercial e industrial y la villa esclavista como unidad primaria de producción agraria. Posiblemente, la fundación de la ciudad romana de Ampurias a fines del siglo II a.C. represente la consolidación de este proceso en el noreste hispano.

La ciudad se construyó siguiendo patrones netamente itálicos. Las calles, trazadas a cordel, formaron un reticulado de *insulae* o manzanas en base a una unidad de medida romana: el pie de 29,5 centímetros. La unión de 120 pies formaba el *actus*, medida base utilizada por los agrimensores al establecer la parcelación de un territorio. Las *insulae* de Ampurias miden 35 × 70 metros, es decir, 1 × 2 *actus*.



1. CONJUNTO GRECORROMANO DE AMPURIAS (Gerona). Al fondo de la fotografía, los núcleos griegos primitivos donde se inició el asentamiento, junto al puerto antiguo ahora colmatado. En primer término, zonas levantadas, más blancas, se contempla la ciudad romana; en el plano inferior, los restos conocidos de ésta; se distinguen los lienzos de muralla, el anfiteatro exterior, la red viaria con la calle principal que desemboca en el foro, grandes viviendas privadas y el foro monumental en parte reconstruido. En color rojo se perfilan las estructuras correspondientes al foro de época republicana.

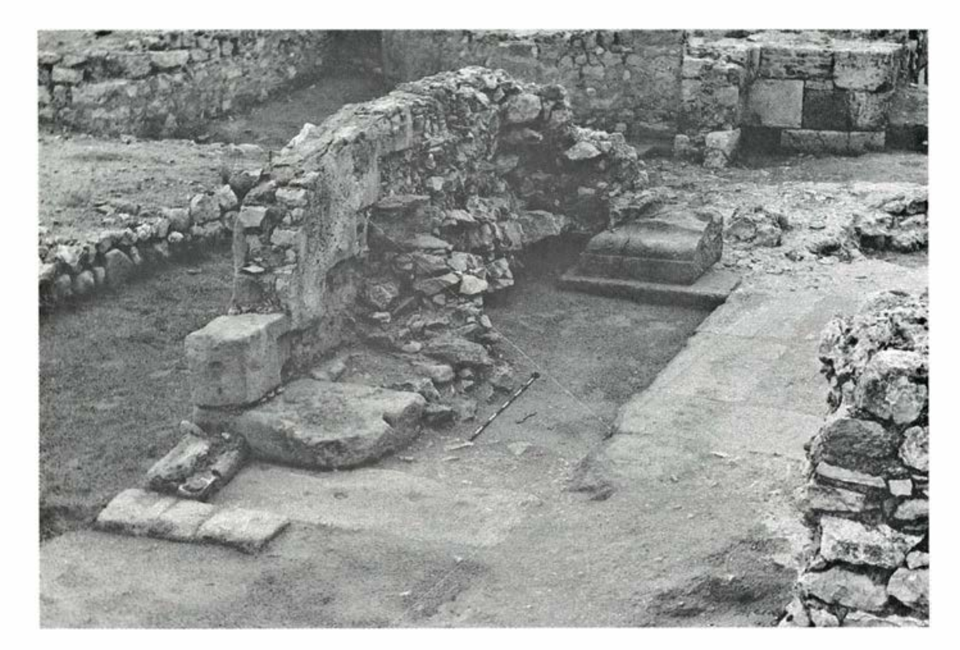
El sector del podio se nos ofrecía rodeado por un gran porticado en forma de *U*, que delimitaba un amplio sector rectangular. Esta estructura urbanística era bien conocida en la edilicia romana para un conjunto foral, cumpliendo unos esquemas desarrollados en Italia ya en el siglo II a.C. y en los que el foro republicano de Ampurias representa el primer ejemplo conocido del mundo romano provincial.

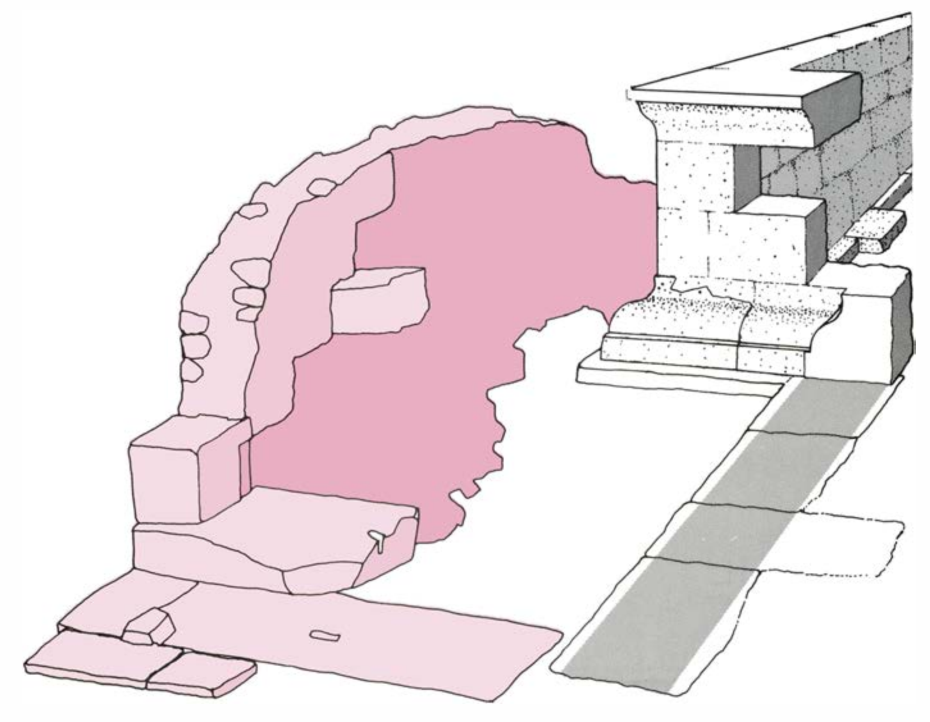
Este tipo de foros presentan una composición desarrollada en dos plazas separadas por un eje viario. En una de ellas se sitúa el *area*, espacio descubierto rodeado de pórticos, que comunica con los edificios político-administrativos. En la otra plaza, en posición central, alzado sobre un podio, se encontraba el templo principal de la ciudad dedicado a Júpiter o a la tríada capitolina (Júpiter, Juno y Minerva).

La tipología edilicia marcaba en nuestro caso la hipótesis de partida: comprobar el carácter del podio como basamento de un templo absolutamente arrasado y, por tanto, de estudio muy problemático. En el mes de julio de 1982, dentro de la campaña de excavaciones centrada en el foro romano, un grupo de trabajo dirigido por Javier Aquilué se dedicó a la tarea de excavar y delimitar el podio. Se trataba de una gran masa informe de 1,20 metros de altura sobre el nivel de la zona, con una planta irregular de 19 metros de longitud y entre 7 y 14 metros de anchura. Sus lados descendían en talud dando al conjunto una imagen de pequeña meseta.

Las primeras excavaciones habían despejado, en el lado este, los restos de una escalera que, en fecha posterior a la construcción del podio, se adosó al mismo. Los restos de esta escalera, un simple muro en el que se distinguen las improntas de los escalones, se apoyan en dos sillares de arenisca que forman una esquina de la base del podio. Estos sillares presentan una moldura exterior y a su vez se apoyan sobre un muro con sillares dispuestos a soga y tizón. Se delimitaron tras la excavación un total de diez sillares.

La conservación de estos pocos elementos nos proporciona un esquema para entender la estructura del podio. Este sería en realidad una gran caja forrada exteriormente por bloques de arenisca, con sus molduras correspondientes en la base y en la coronación del podio, y rellena en su interior por un amasijo de tierra y piedras. Al ser robados estos sillares exteriores para su nuevo aprovechamiento, todo el relle-





2. PODIO sobre el que se alzaba el templo del foro romano. Tenía una moldura en su base y otra –invertida– en su coronación. La fotografía presenta los restos conservados, en tanto que el dibujo avanza un ensayo de reconstrucción. La altura que tuvo el podio la deducimos de la pendiente de una escalera adosada posteriormente al mismo. Se observa también la disposición de los sillares de la cimentación alternados paralela y perpendicularmente al muro para garantizar la cohesión interna del mismo.

Como espacio público, la ciudad fue dotada de un foro situado cerca de una de las puertas de entrada a la misma y comunicado con ella por el eje viario principal: el *kardo maximus*. Como ya se ha mencionado, este conjunto fue delimitado en 1964 y su lenta excavación ha ocupado los veinte años siguientes.

Las arenas que cubrían las ruinas del lado norte de la plaza fueron retiradas en 1966, dejando al descubierto una estructura de difícil valoración. Se trataba de un macizo informe de piedras, tierra y hormigón en el que se adivinaba la presencia de algunos muros empotrados. Hasta 1982 se conocía esta estructura como "el podio". La hipótesis de situar sobre este podio los restos del principal templo de la ciudad partió del estudio conjunto de las estructuras del foro. Este aparecía como una plaza rodeada por una columnata y articulada en torno a dos calles: el *kardo maximus*, procedente de la puerta sur de la ciudad, que entraba en el foro llegando a los pies del podio, y un *decumanus*, o calle este-oeste que cruzaba el foro en el mismo punto donde concluía el *kardo*.

no interior quedó expuesto a la erosión y en consecuencia se fue derrumbando lentamente hacia los lados dando a los restos su aspecto actual.

El derrumbe del podio permitía descubrir nuevos elementos de gran valor arquitectónico. Así, el relleno interno no se reveló como un conjunto uniforme, sino que, entre el amasijo de piedras, se delimitaban unos muros empotrados construidos con piedras irregulares unidas con argamasa (este tipo de paramentos recibe el nombre de *opus incertum*). Un primer muro, en la zona sur, medía 140 centímetros de anchura; le seguía, a 4,25 metros, otro muro de 110 centímetros y, por fin, en el extremo norte, se situaba un último muro de 53 centímetros de grosor.

La importancia de estos muros es fundamental: nos están indicando la planta del edificio que se alzó sobre el podio, a cuyas paredes debían servir forzosamente de cimentación. El muro sur tuvo que ser el cimiento de la columnata frontal y los otros dos muros servirían de apoyo a las paredes de la *cella* o cámara sacra del templo.

Los saqueos que en época tardorromana y medieval sufrieron las ruinas de *Emporiae* habían borrado todo rastro de aquel templo que podemos imaginar construido en obra de sillería. Igual destino corrieron la práctica totalidad de los bloques que revestían el podio a excepción de los pocos conservados *in situ*. ¿Cómo encontrar elementos para reconstruir el templo? La búsqueda en los almacenes del Museo de Ampurias donde se guarda el material de las excavaciones reveló la existencia de fragmentos de pilastras y de capiteles de orden corintio labrados en arenisca. Estos fragmentos habían sido hallados en 1966 al retirar la gran capa de arena que cubría por entero los restos del podio. Otro elemento de gran importancia apareció cubierto aún por la arena, caído al costado mismo del podio. Se trataba de un sillar perteneciente a una pilastra que presentaba cuatro acanaladuras en dos de sus caras: una pilastra, pues, de ángulo. Más adelante veremos hasta qué punto fueron decisivos estos hallazgos.

Las excavaciones de 1982 buscaron ante todo la delimitación de la planta del podio y estudiar su sistema constructivo. Para ello se trabajó en extensión, siguiendo el perímetro de la plataforma en busca de los sillares que la conformaron exteriormente. Como era de prever, estos sillares habían desaparecido en su práctica totalidad. La excavación minuciosa permitió descubrir las trincheras de saqueo y poner de manifiesto que los sillares habían sido asentados en el momento de la construcción sobre una solera de argamasa. Esta, tras el robo de los bloques, quedaba de nuevo a la vista. En la solera se dibujaban las siluetas de los sillares dispuestos a soga y tizón, a lo largo del perímetro del podio. Ello permitió medirlo y dibujarlo enteramente.

Se comprobó, además, que el podio poseía un segundo forro interior a lo largo de su perímetro, compuesto por muros de *opus incertum* adosados a los lienzos de sillares. En toda la parte sur, el muro correspondiente aparecía caído sobre la trinchera de saqueo de los sillares, caída provocada, sin duda, por el robo de éstos. La anchura total del muro perimetral uniendo el *opus incertum* y el lienzo de sillares sería de 1,60 metros.

Continuó la excavación en la parte anterior del templo situada al sur. Se comprobó que, según indicaban ya los escasos sillares conservados, el podio se ampliaba en su parte frontal pasando de 9 a 12 metros de anchura. Este ensanchamiento se producía justo delante del primero de los muros encajados en el interior del podio, correspondiente a la cimentación de la columnata, y se extendía ante él formando un suave talud. Al retirar la arena, quedaron a la vista los restos muy deteriorados de un macizo en posición lateral respecto de la fachada principal del templo, que delimitaba un espacio central. La limpieza ciudadosa de ese intervalo reveló la existencia de escalones construidos en arenisca, también muy deteriorados. Se habían conservado únicamente tres, pero el poder medir su anchura, y puesto que conocíamos la distancia entre el límite frontal del podio y el muro de sustentación de la columnata, nos permitió deducir que el número de escalones había sido de siete. La pared frontal del podio quedó así delimitada por dos macizos laterales (uno de ellos absolutamente arrasado pero reconstruible por simetría), enmarcando una escalera central.

Una vez conocida la planta del podio, era preciso averiguar su altura original. La presencia de los muros internos de cimentación proporcionaba un primer indicio, pero nos faltaba conocer el grosor del suelo superior. En esta ocasión la información provino de las escaleras laterales antes mencionadas. El muro de una de estas escaleras conservaba las improntas de los escalones hasta su parte más alta, y ésta coincidía con la observada en la reconstrucción de la escalera frontal. La altura en ambos casos era de 1,60 metros.

Los sillares del podio estuvieron originalmente estucados, estuco pintado de rojo en algunas partes, según puso de relieve la excavación. Entre los fragmentos recuperados destacaron algunos moldurados en forma de gola, es decir, en posición inversa a la moldura de los sillares de la base del podio. Se aclaraba, pues, que la moldura de coronación del podio no estuvo formada por nuevos sillares, sino simplemente conformada con estuco.

Resumiendo, el podio aparecía como una plataforma revestida de sillares estucados y con zonas pintadas de color rojo. La planta, en forma de *T*, correspondía al templo propiamente dicho y a dos macizos frontales que enmarcaban la escalera de acceso. En un momento posterior se adosaron al conjunto dos escaleras laterales como accesos complementarios.

El templo romano constaba esencialmente de una *cella*, cámara sacra que albergaba la estatua de la divinidad, y de una columnata, que podía rodear la cámara o bien sólo precederla. En el primer caso, el templo se denomina *períptero*; en el segundo, *prostilo*. El estudio de las cimentaciones conservadas en el podio, incluyendo los datos suministrados por la excavación de su perímetro, mostró la existencia de un muro perimetral de doble aparejo (*opus incertum* y sillería) de 1,60 metros de anchura. Con este muro limitaban, además, tres muros transversales incrustados en los rellenos del podio, con anchuras de 1,40, 1,10 y 0,50 metros, respectivamente.

El templo alzado sobre este podio no pudo ser nunca períptero. De serlo, aparecerían lateralmente dos cimentaciones: una correspondiente a las paredes de la *cella* y otra para sostén de la columnata. La presencia de una única cimentación indicaba que el templo era prostilo, es decir, que poseía una *cella* precedida de una columnata frontal. Existía un elemento que permitía concretar aún más esta imagen. Habíamos mencionado anteriormente la presencia junto a los restos del podio de un sillar de pilastra con dos de sus caras grabadas con profundas estrías. Este sillar, perteneciente a una pilastra angular, imitaba con su labra una columna adosada a la pared. Se trata de una solución habitual en la arquitectura romana que se denomina *pseudoperíptera*. La cámara, en vez de ir rodeada lateralmente por una columnata independiente, la incorpora a sus propias paredes por medio de pilastras intercaladas en los paramentos.

El siguiente paso en la investigación

consistía en averiguar el ritmo de la columnata frontal prolongada en los laterales con las pilastras de la *cella*. ¿Qué distancias mediaban entre los ejes de las columnas? Para resolver esta cuestión poseíamos dos datos fundamentales: en primer lugar, las dimensiones totales del podio, en anchura y longitud. En segundo lugar, el sillar de pilastra nos indicaba el grosor de los fustes de las columnas. Esta medida se situaba en torno a los 80 centímetros. Y así emprendimos un estudio de modulación, la búsqueda del sistema de medidas usado por los constructores y, en definitiva, del elemento generador de las proporciones de todo el edificio.

Comenzamos por la columnata frontal. ¿Cuántas columnas se situarían en ella? Sabemos que los templos iban siempre precedidos de un número par de columnas: cuatro (tetrastilo), seis (hexastilo), ocho (octastilo), etcétera. Para averiguar este número se calculó en primer lugar la anchura del templo. A las paredes laterales del podio se les descontó el vuelo de la moldura de base. La anchura de estas paredes pasó a ser entonces de 1,10 metros, el mismo grosor que presentaba la cimentación frontal. Se midió a continuación la distancia entre los ejes de ambas paredes que resultó ser de 8,25 metros. Si dividiésemos esta distancia entre 3,5 o 7 obtendríamos la distancia "entre-ejes" para la columnata, según ésta hubiese poseído 4, 6 u ocho columnas.

Los resultados obtenidos son 2,75, 1,65 y 1,17 metros. Ahora bien, conocíamos a partir de la pilastra conservada un grosor estimado para las columnas en torno a los 80 centímetros. Podíamos pues calcular qué relación se establecería entre los ejes y este grosor, es decir, averiguar las anchuras de sus respectivos intercolumnios. Realizado el cálculo, las distancias obtenidas equivalen a 1,95 metros para el templo tetrastilo, 85 centímetros para el templo hexastilo y 37 centímetros para el templo octastilo. Era, pues, evidente que ninguna de estas dos últimas soluciones podía ser correcta, ya que un intercolumnio de anchura inferior a 1 metro hubiese hecho muy dificultosa la circulación y el acceso al templo.

Concluimos que la situación correcta para el intervalo entre ejes de la columnata frontal era de 2,75 metros, correspondiente a columnas de aproximadamente 80 centímetros de diámetro en la base e intercolumnios de 1,95 metros. La columnata frontal debió ser, pues, tetrastila. Acto seguido se trasladó esta medida a la fachada lateral del templo. La distancia entre el muro que contenía la puerta de la *cella* y el muro posterior de la misma marcaría, en las fachadas laterales, la posición de las pilastras extremas, adosadas al muro exterior del templo. Se midió esta distancia entre los ejes de ambos muros que resultó ser de 11 metros. Si comparamos esta dimensión con el ritmo deducido para la columnata frontal, obtendremos, cuatro entre-ejes exactos (11/2,75 = 4). Es decir, que en los muros laterales de la *cella* podríamos situar cinco pilastras adosadas, manteniendo idéntico ritmo que la columnata frontal.

Se observó a continuación que la distancia entre la columnata frontal y la puerta de la *cella* era excesiva para el ritmo deducible en los entre-ejes de las pilastras. Esta distancia media entre los ejes de las cimentaciones resultó ser de 5,68 metros. Existía, pues, el espacio suficiente para situar una columna exenta entre la columnata y la *cella* manteniendo el ritmo observado de 2,75 metros. En esta ocasión se apreciaba un ligero error de 18 centímetros (2,75 × 2 = 5,5 metros; ahora bien, 5,68 − 5,5 = 0,18 metros). Error que pudo obedecer a un desplazamiento de estas columnas laterales o a un descentramiento en la columnata de fachada respecto al muro corrido que le servía de cimentación.

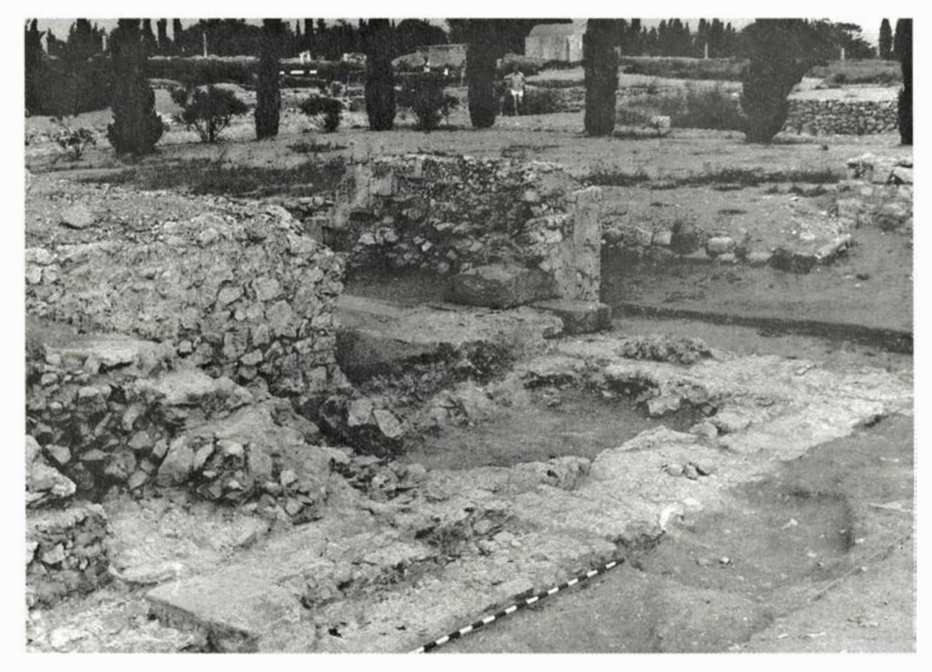
Resumiendo, el templo poseería una fachada frontal formada por cuatro columnas y dos laterales de siete. De estas últimas, dos serían propiamente columnas exentas y cinco pilastras adosadas a las paredes de la *cella*. El templo se definiría pues como prostilo, tetrastilo y pseudoperíptero.

Habíamos deducido una distancia de 2,75 metros para el intervalo entre-ejes de la columnata y observado cómo esta medida se relacionaba con las dimensiones totales del edificio. Urgía averiguar qué relación se establecía entre esta medida y los sistemas de medición empleados en el mundo romano en la época de construcción del templo (fines del siglo II a.C.).

El pie romano adoptado oficialmente en Roma en el 268 a.C. medía aproximadamente 0,296 metros. No obstante, en el occidente mediterráneo se han documentado otros sistemas de medida igualmente empleados en el mundo romano. Entre estos destacaremos fundamentalmente la existencia del pie ptolemaico de 0,309 metros y el pie itálico u oscumbro de 0,275 metros.

La relación existente entre la medida generadora de las proporciones del templo y alguna de estas dimensiones es evidente. El entre-ejes de la columnata equivale exactamente a diez veces el pie itálico de 0,275 metros. Esta dimensión es la *pertica*, la vara de diez pies utilizada por el *redemptor* o capataz de obras.

¿Ajustaban sus medidas las diferentes partes del monumento a pies de 0,275 metros? Los resultados de la comprobación fueron satisfactorios. Las anchuras observadas en todos los muros se aproximaban a dimensiones expresada en pies y lo mismo ocurría con las dimensiones generales del edifi-



3. SECTOR ANTERIOR DEL TEMPLO tras su excavación. A la izquierda se distinguen restos de la escalinata frontal del edificio adosada al muro de cimentación de la fachada. En primer término, la solera de argamasa con las improntas de los sillares del muro saqueados de antiguo para su reutilización.

cio. El diámetro de las columnas en su base al que nos aproximábamos a partir del sillar de pilastra conservado podía ahora concretarse en 82,5 centímetros, es decir, 3 pies.

La utilización de este módulo como elemento generador de la construcción se plantea llena de sugerencias. La ciudad romana de Ampurias se planificó de acuerdo con el pie romano de 0,296 metros. Sin embargo, ahora encontramos el templo principal de la ciudad construido según otro sistema de medidas. ¿A qué obedece este cambio?

Los estudios de metrología desarrollados en el siglo XIX demostraron que el pie itálico se utilizó en la propia Roma con anterioridad a la adopción oficial del pie romano en el 268 a.C. Sin embargo, su uso se ha documentado principalmente en zonas de la Italia meridional: Campania y Samnio. Este fue, por ejemplo, el sistema métrico utilizado en las construcciones de Pompeya, al sur del golfo de Nápoles, antes de su anexión definitiva por Roma en el 89 a.C. Esta zona fue uno de los pilares del comercio romano de época republicana. Roma, que no poseyó buenos puertos hasta época imperial, canalizó anteriormente, desde el 199 a.C., su comercio exterior a través del *portorium* de Pouzzoles, completado con la fundación de la colonia romana de *Puteoli* en el 194 a.C. en el mismo golfo de Nápoles.

En este orden de cosas podemos imaginar, pues, la siguiente situación: en el momento de la fundación de la ciudad romana de Ampurias, los agrimensores, ligados a medios militares, trazaron la retícula urbana sobre el patrón del pie romano. De esta regla se escapó el templo principal de la ciudad, diseñado como obra independiente, relacionada quizá con algún personaje principal de la ciudad que financió su construcción y la encargó a un *architectus* o a una *officina* (taller) que trabajaba con un sistema de medidas diferente. Es muy probable que esta o estas personas fueran oriundas de la Campania.

Hay indicios que apuntan en esta dirección. La moldura de base del podio, denominada *kyma reversa*, es una moldura de doble curvatura (gola) situada en posición invertida. Es un elemento de claro sabor helenístico. Su empleo se generalizó en Italia a fines del siglo II a.C. como consecuencia de las influencias helenísticas en contraposición al uso de molduras de cuarto bocel propias de los templos etruscos. Destacaremos que este tipo de molduras está presente en los principales santuarios de la zona samnita, construidos a lo largo del siglo II a.C., en la época de gran esplendor económico que acompañó a estos pueblos como premio de su fidelidad a Roma en la segunda guerra púnica.

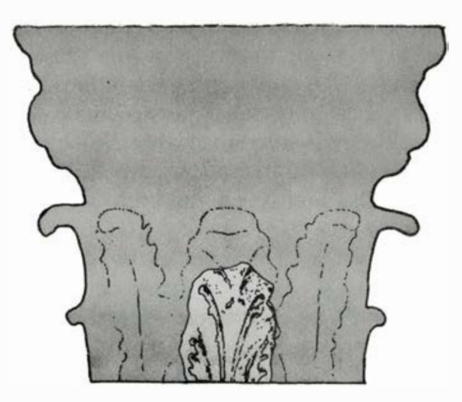
Para la datación de nuestro templo contamos fundamentalmente con los fragmentos de cerámica aparecidos entre la tierra que rellenaba el podio. Este material, correspondiente al momento de construcción del edificio, ha sido fechado a fines del siglo II a.C. En la campaña de excavaciones de 1982 pudo comprobarse que estos materiales coinciden con los que aparecen en todos los rellenos constructivos relacionados con la fundación de la ciudad: pavimentación de calles, levantamiento de murallas, etcétera. Actualmente el estudio conjunto de estos complejos cerámicos permite obtener cronologías muy aproximadas. Son materiales característicos de fines del siglo II a.C.

Volvemos a encontrar aquí un paralelismo. Muchos de estos materiales cerámicos corresponden a importaciones itálicas que llegan a la península acompañando el comercio del vino. Gran parte de este comercio, evidenciado a partir del estudio de las ánforas, la vajilla de barniz negro, vajilla común, lucernas y otros elementos, procedía de los puertos del golfo de Nápoles.

Los restos conservados del templo nos han permitido hasta ahora efectuar una propuesta de restitución en planta y avanzar hipótesis sobre el origen de sus constructores. Para trascender esta fase de análisis en la restitución del edificio precisaremos de un nivel de estudio complementario que nos saque a luz las características de los alzados del templo. Dada la escasez de datos se trata de una labor delicada que irá apoyada en consideraciones externas al propio monumento.

En el mundo antiguo un edificio público, y más uno religioso, no se concebía nunca al azar, sino que se construía de acuerdo con un sistema de proporciones que relacionara sus diferentes partes. El desarrollo de este principio nos orientará en la restitución aproximada de las partes desaparecidas del edificio.

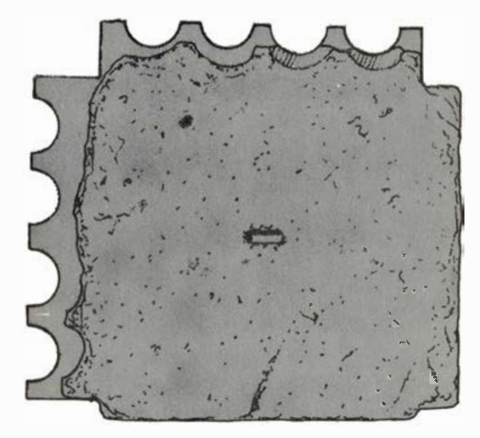
La definición de proporciones en arquitectura no es una creación genuina del arte romano. Fue herencia de la edilicia griega, que con ellas trató de alcanzar, a través de un marco filosófico y teórico, la esencia misma de la belleza. La identificación de la belleza de una obra de arte a través de la "armonía" que reina entre sus partes nació en el mundo griego de dos líneas distintas de pensamiento filosófico: la platónica, que consideró la belleza como una idea abstracta, un modelo prefijado e invariable; y la pitagórica, que apoyó su desarrollo en los valores simbólicos de los números. Ambas coincidían en entender que el cosmos respondía a unas leyes generales y que la armonía surgía en la medida en que se reflejaban estas leyes. Un ejemplo de esta reflexión se obtenía en la relación entre proporción y armonía musical. Las consonancias musicales que se establecen al vibrar cuerdas cuyas longitudes se relacionan armónicamente son agradables al oído y reflejarían parte de la estructura matemática que rige el universo.



4. RECONSTRUCCION de un capitel corintio del templo a partir de un fragmento conservado. La altura del capitel se deduce a partir del diámetro de su columna, en nuestro caso 82,5 centímetros.

La arquitectura, pues, para ofrecer sensaciones armónicas a la vista, se vería forzada a reproducir estas leyes generales. El griego buscaba esas leyes en las propiedades geométricas de las figuras regulares y en las de ciertos números. No obstante estamos muy lejos de conocer cuál fue la exacta utilización de estas ideas.

Policleto, por ejemplo, fijó su canon, referido a la relación entre las partes del cuerpo humano, utilizando la $\sqrt{2}$. La relación obtenida fue considerada



5. SECCION DE PILASTRA adosada al muro del templo. Corresponde a una de las esquinas. Sugiere la presencia de columnas inexistentes.

por los antiguos como el paradigma de la belleza anatómica. La paradójica cualidad de esta dimensión radica en que $\sqrt{2}$ es un número que no puede ser medido; es inconmensurable. Sólo puede ser construido gráficamente utilizando la diagonal de un cuadrado de lado la unidad.

El recurso a diagonales de cuadrados, hexágonos o pentágonos al trazar la fachada de un edificio representa de hecho introducir los números $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ o $\sqrt{5}$ en el sistema de proporciones resultante. Estas relaciones, que no pueden expresarse como múltiplos o submúltiplos de números naturales, han de ser construidas necesariamente con medios gráficos. Estos planteamientos, que impregnaban el modo de operar de la construcción griega, se llevaron a la práctica utilizando pequeños grupos de artesanos, altamente cualificados, agrupados en talleres móviles. Esta organización tomaba como directriz la idea misma del proyecto y su correcta resolución se anteponía a la eficacia del rendimiento.

Cuando Roma en el siglo III a.C. comenzó su expansión militar, las ideas antes descritas se encontraban dispersas por todo el Mediterráneo helenístico. Buena parte de Italia las utilizaba ya con asiduidad. En el curso de un siglo escaso, la ciudad del Lacio dejó de ser un mero centro comercial provinciano para convertirse en la capital helenística del Mediterráneo. Enriquecida con los inmensos botines de sus conquistas militares, la clase dirigente romana se vio en la necesidad de potenciar una arquitectura de prestigio que reflejara el poder y la grandeza de los nuevos tiempos. Para ello se recurrió a los modelos griegos, los de mayor valor simbólico que, poco a poco, fueron adaptados a la nueva mentalidad.

Se desarrolló una arquitectura donde el rendimiento global primó sobre la resolución de los aspectos de detalle. Los talleres especializados fueron lentamente sustituidos por cuadrillas de obreros de baja cualificación, que trabajaban bajo esquemas muy rígidos, con ritmos de trabajo casi industrializados.

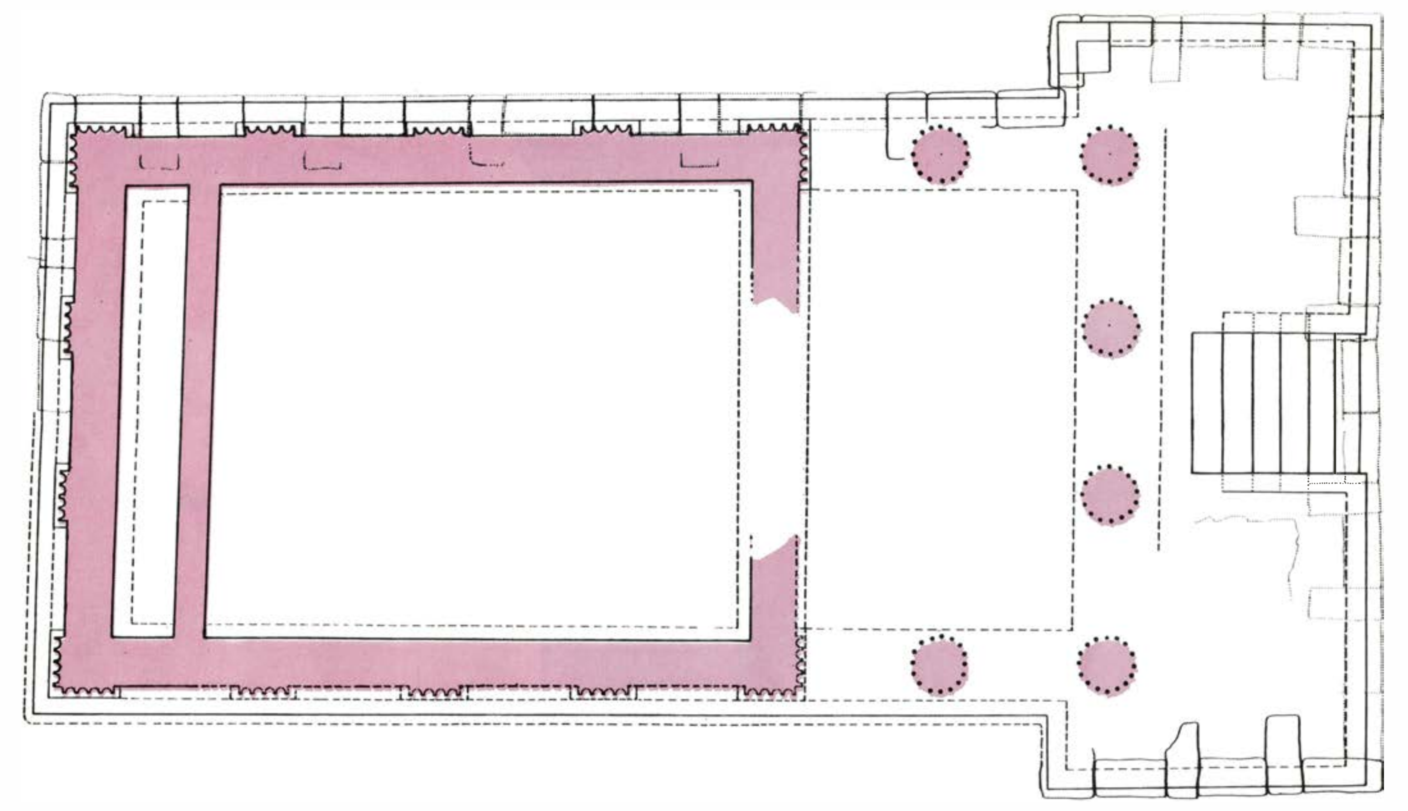
La arquitectura griega había creado sus sistemas de proporción sobre el gozne de la analogía, que incluía por definición medidas inconmensurables. Afirmar que $a/b = c/d$ es demostrar una proporción aritmética, es decir, un caso particular de analogía. Frente a este concepto, la arquitectura romana destacó el uso de la *symmetria*. La idea de simetría que en su actual acepción se asocia al equilibrio entre las proporciones de un cuerpo respecto a un eje, se utilizó en el mundo romano como referencia al establecimiento de un orden de medida o, lo que es lo mismo, una conmensurabilidad entre las partes. Decir, por ejemplo, que una columna mide 8 unidades o módulos es enunciar una *symmetria*. En cambio, referir un entablamento a la columna como 1 es a 3,5 significa expresar una analogía.

¿Qué tiene todo esto que ver con el templo ampuritano? Al examinar el sistema de medidas utilizado para edificar el templo dedujimos que los constructores se expresaban en pies de 27,5 centímetros. Si exponemos nuevamente las dimensiones del templo, medidas ahora en pies, observamos que todas son múltiplos de 5. Es decir, podríamos superponer a la planta del templo una malla ortogonal de 5 × 5 pies. Las proporciones aparecidas quedan reducidas a simple *symmetria* con respecto a este módulo: la anchura total del podio equivale a 9 de estas unidades (45 pies), la longitud total a 16 (80 pies), etcétera.

Entre estas medidas existe otra relación que con los datos disponibles sólo podemos intuir. Si efectuamos el cociente entre la longitud y la anchura del podio expresadas en pies, obtenemos una relación (80/45 = 1,7), que podríamos interpretar como una aproximación a $\sqrt{3}$: 1,73205... Si establecemos la misma relación entre la longitud y anchura de la planta correspondiente al templo, que miden respectivamente 65 y 35 pies, tenemos un cociente de 1,857. Que de nuevo vuelve a ser una aproximación a $\sqrt{3}$.

Nos preguntamos si el esquema de proporciones de la planta del podio y

6. PROCESO DE RECONSTRUCCION DEL PODIO. Se muestra arriba los restos conservados, en el centro la construcción del primer momento y abajo según quedó tras el añadido de las escaleras de acceso posterior con los basamentos de estatuas. Los restos conservados de las escaleras permiten restituir la altura del podio y el estudio metrológico de los muros conservados nos suministra la planta general.



7. PLANTA RECONSTRUIDA DEL EDIFICIO. La cimentación de los muros incluida en el interior del podio nos da el trazado de las paredes. El estudio metrológico permite situar los elementos ornamentales (columnas, molduras y pilastras adosadas). La anchura frontal del podio es de 12,5 metros, equivalente a 45 pies romanos; la anchura en la parte posterior es de 9,8 metros (35 pies); la longitud total del podio alcanza los 21,7 metros (80 pies), dividida en una banda ancha de 20 pies y una estrecha de 60 pies. Estos datos sugieren que se usó una malla de 5×5 pies en el trazado de las cimentaciones. La anchura del edificio que se alzaba sobre el podio era de 9,35 metros, separación que dejaba lugar a tan sólo cuatro columnas en la fachada.

del templo no guardaría relación con un sistema de cocientes inconmensurables. Si esto fuera así, lo que se insinuaría tras esta relación sería la existencia de modelos helenísticos basados en analogías complejas. Los constructores del templo de Ampurias habrían reducido esta cuestión a un simple esquema de diseño fundado en unidades modulares, lo que simplificaría sobremanera el proceso constructivo. El error en el uso de los cocientes nos vendría dado por la dimensión de la malla de referencia utilizada. En nuestro caso supondría errores de ± 68,75 centímetros, es decir, la mitad del módulo utilizado (5 pies o 137,5 centímetros).

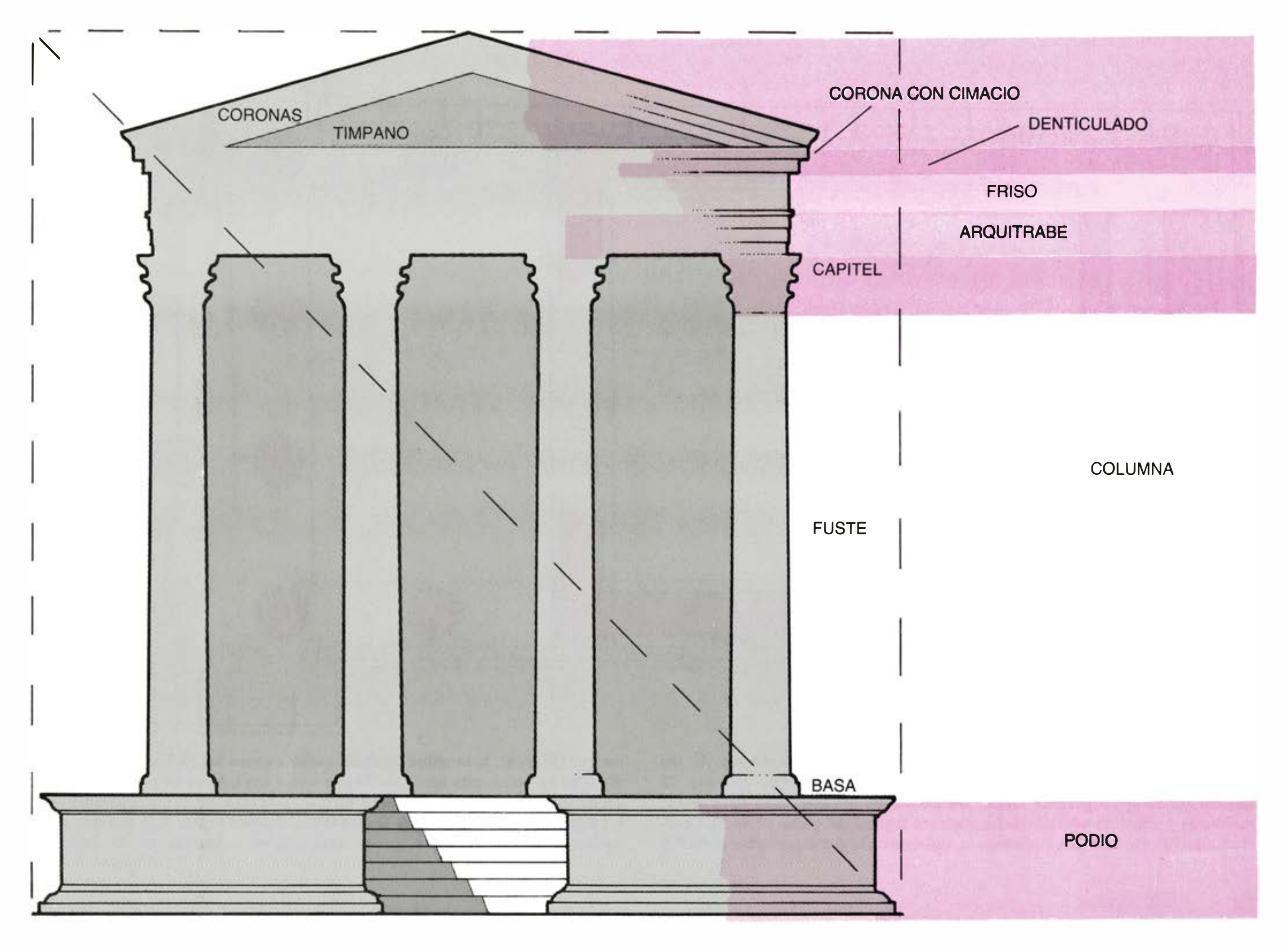
Si la planta del templo se nos presenta como un sistema de dimensiones interrelacionadas, podemos pensar en la existencia de un sistema análogo que generara los desaparecidos alzados del edificio. Contamos como únicos restos conservados para esta restitución con dos pequeños fragmentos de capitel de pilastra encontrados en las excavaciones de 1964. Corresponden a capiteles de orden corintio.

Para restituir el alzado del templo deberemos recurrir a los sistemas de proporciones descritos por Vitrubio. La obra vitrubiana recopiló todo lo que debía saber un *architectus*. Para cumplir este objetivo, Vitrubio, que procedía del campo de la ingeniería y no de lo que hoy entendemos estrictamente por arquitectura, tuvo que recurrir a obras de diferentes autores, principalmente griegos y helenísticos, según él mismo reconoce en el prólogo de su libro VII *De Architectura*. Tratado éste que escribió cien años después de la adopción definitiva en Roma de la arquitectura helenística, en una época en que los conceptos griegos se iban olvidando. El contexto científico en que se sitúa Vitrubio corresponde al pragmatismo de un "constructor" que busca resultados rápidos, sin ahondar en los métodos y planteamientos teóricos de los autores a que recurre. En diferentes puntos de su obra se trasluce que maneja conceptos que no ha terminado de asimilar. Por ejemplo, cuando habla del número π en el libro X no acaba de quedar claro qué aproximación prefiere, si 3 o 3 + 1/6.

Los libros III y IV están dedicados a la construcción de edificios religiosos. El autor recoge distintas fuentes sin someterlas a ningún análisis crítico. A pesar de lo poco explícito que resulta el texto respecto a los autores utilizados, por algunas citas indirectas y por ciertas especificaciones referidas a elementos ornamentales podemos remontar estos dos libros al desarrollo de la arquitectura helenística de los siglos III y II a.C. La actividad de estos tratadistas se produjo precisamente en la misma época en que tuvo lugar la construcción del templo ampuritano.

Por todo lo expuesto, la validez de la información contenida en los libros III y IV de Vitrubio y su aplicación a la hora de restituir los alzados del templo de Ampurias dependerán de varios factores. En primer lugar, del análisis e interpretación de unos textos oscuros e imprecisos; en segundo lugar, del rigor con que Vitrubio refleje las tradiciones helenísticas, y, en tercer lugar, del arraigo con que contaran éstas entre los *architecti* del siglo II a.C. hasta el punto de suponer que los constructores del templo se ajustaron a ellas.

Siguiendo las normas vitrubianas, consideraremos como elemento generador de los alzados del edificio el diámetro de la columna en el arranque de su fuste. Esta medida, que hemos deducido a partir del fragmento de pilastra conservado, puede concretarse en 82,5 centímetros equivalentes a 3 pies. La altura total de las columnas, los capiteles, arquitrabes, tímpano y demás componentes pueden estimarse en función de este módulo base.



8. ALZADO Y PERSPECTIVA del templo. Se trataría de un templo prostilo tetrastilo (con columnata frontal de cuatro columnas) y pseudoperíptero (con pilastras laterales adosadas al muro simulando columnas), levantado sobre un podio con escalera frontal de siete escalones, al que en un segundo momento se le añaden dos escaleras de acceso posterior alineadas con dos basamentos para estatuas. Por su situación principal en el foro, el templo tuvo que estar

Vitrubio describe el sistema de proporciones para el templo jónico y dórico, pero no para el corintio. En este orden, nacido de los anteriores, "todos los otros elementos que van sobre las columnas se toman ya del orden dórico, ya del jónico y se adaptan a las columnas corintias" (IV, I). El capitel corintio aumenta la esbeltez de las columnas al tomar una altura igual al diámetro del fuste, mientras que el capitel jónico sólo toma 1/3.

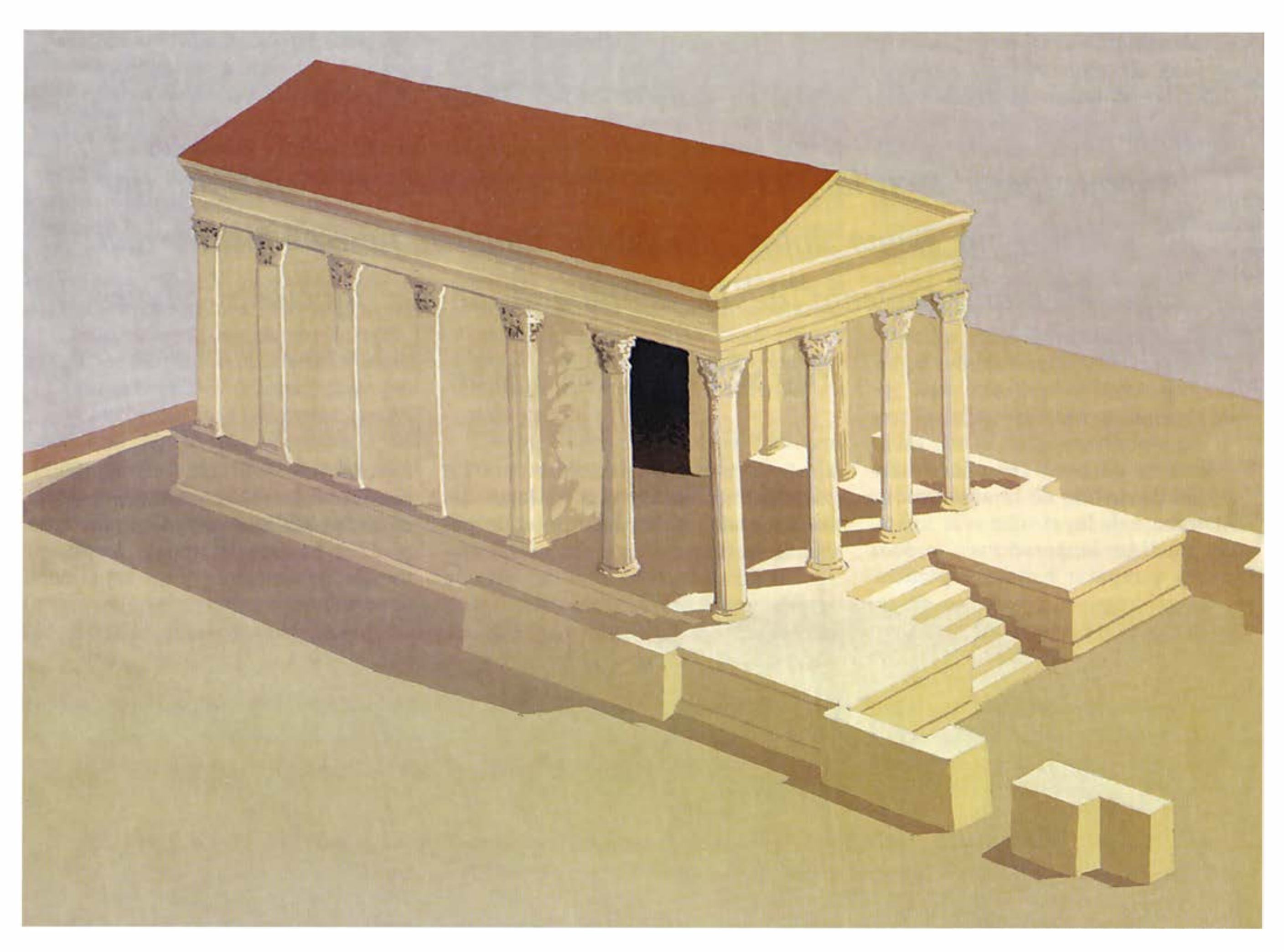
En nuestro caso estamos condicionados por el hallazgo de los fragmentos de pilastras corintias que nos indican el orden del templo. La reconstrucción del alzado se efectuará, pues, del modo siguiente: La altura de la columna será igual a 8,5 diámetros de su base. Como nuestra columna es corintia, incrementaremos la dimensión obtenida en 2/3 de diámetro (diferencia entre el capitel jónico y el corintio). La altura resultante final se sitúa en 756 centímetros, correspondientes a 27,5 centímetros de base, 646 de fuste y 82,5 centímetros del capitel corintio. Para el caso de columnas cuya altura se sitúa entre 25 y 30 pies (en nuestro caso 27,5) Vitrubio establece para el arquitrabe del orden una dimensión equivalente a 1/12 de la altura de la columna. Como la columna mide 756 centímetros el arquitrabe tomará 63 centímetros.

"El friso debe ser una séptima parte menor que el arquitrabe", escribe el autor romano. Corresponderán pues al friso 6/7 de la dimensión del arquitrabe, es decir 54 centímetros. El entablamento situado sobre la columnata se completará con el denticulado, justo encima del friso y la corona con el cimacio. La altura correspondiente a ambos se establece en los 2/7 de la altura del arquitrabe. En nuestro caso 18 centímetros.

Con estos elementos alcanzaríamos la parte superior de la cornisa horizontal o corona del templo. Sobre ella se situará el tímpano y las molduras inclinadas que lo limitan: coronas y golas. Para obtener la altura del tímpano, manda Vitrubio dividir la longitud máxima de la cornisa de coronación de la fachada frontal del templo en nueve partes, tomando una como altura del tímpano. La cornisa mide 9,65 metros; por tanto, la altura del tímpano será de 1,07 metros.

Las cornisas inclinadas que delimitan el tímpano deben ser iguales a las que coronan el entablamento de la columnata. Sobre estas coronas ha de situarse la moldura que oculta el canalón de desagüe de la cubierta del edificio o "gola". La proporción de la gola habrá de ser 1/8 más alta que una de las coronas. Las dimensiones respectivas serán, pues, de 18 centímetros para las coronas y 20 centímetros para la gola.

Resumiendo los cálculos efectuados, obtendríamos como altura total del templo, considerando su orden corintio, 12,37 metros, suma de los componentes siguientes: altura del podio, 1,65 metros; altura de columnata, 7,56 metros; del entablamento, 1,53 metros; del tímpano y coronas, 1,63 metros (con un pequeño error por defecto al considerar la dimensión de las coronas no en vertical sino en su perpendicular).



dedicado a Júpiter o a la tríada capitolina (Júpiter, Juno y Minerva), dioses principales del panteón romano. Las proporciones de cada uno de los elementos de la fachada constituyen sólo una hipótesis construida a partir del tratado sobre arquitectura de Vitrubio. Aunque escribió su libro en época de Augusto y, por tanto, cien años después de la construcción de este templo, se remonta a tradiciones helenísticas más antiguas. (Dibujos de Mar, uno de los autores.)

Con estos cálculos teóricos, ¿nos hemos aproximado a la realidad pretérita del alzado del templo o se trata tan sólo de una ilusión especulativa? La total destrucción del templo nos impide confirmar o rebatir estos datos, retenidos en el nivel de la mera hipótesis. No obstante, contamos con un elemento de contrastación: la relación existente entre las alturas estimadas en la reconstrucción teórica del alzado y las dimensiones observadas en la planta del podio.

Al efectuar esta relación se observan coincidencias aparentemente significativas. Habíamos inferido una altura total del templo de 12,37 metros; la anchura de la parte posterior del podio era de 9,9 metros; la parte frontal del mismo mide 12,50 metros. De lo que se deduce que la altura total del templo coincide con gran aproximación (13 centímetros de diferencia) con la anchura frontal del podio. Esta relación nos sugiere el uso del cuadrado como figura generadora del trazado de la fachada. Así, el ensanchamiento frontal del podio trataría de equilibrar la pesadez de la fachada sobre un podio demasiado estrecho.

Otra relación puede establecerse entre la longitud total del podio y la altura de la coronación del entablamento. El podio se extiende longitudinalmente 21,67 metros y la altura de la corona se ha cifrado en 10,74 metros; por tanto, la longitud total del podio es aproximadamente igual al doble de la altura de la corona horizontal (con un error de 19 centímetros).

Estas relaciones entre las medidas observadas en la planta y la propuesta de restitución de los alzados corroboran la validez de nuestra hipótesis. El templo romano del foro de Ampurias nos aparece como un compromiso entre una idea inicial del proyecto muy intelectualizada y un proceso de construcción en general carente de un rigor técnico semejante. Los progresivos ajustes del proyecto inicial en las diferentes fases de la construcción responden a necesidades de replanteo y coordinación de los diferentes equipos de trabajo que colaboraron en la obra y desdibujaron, sin duda, lo que había sido el proyecto inicial.

La restitución de los alzados posee su propia problemática. Se ha esbozado un esquema del aspecto que pudo tener el templo recurriendo a los textos clásicos y razonando su utilización. Las coincidencias observadas entre los alzados y las dimensiones en planta son desde luego significativas, pero es necesario guardar un sano escepticismo ante esta cuestión. Los datos teóricos nos han sido útiles como punto de referencia, mas resulta aventurado asegurar que el templo de Ampurias se ajustara estrictamente a los conceptos helenísticos descritos por Vitrubio. Al igual que las proporciones en planta sufrieron desviaciones de la idea original, también los alzados se reajustarían en función del trabajo de las diferentes cuadrillas. El *architectus*, el *curator operis* (capataz) y los *fabri* (obreros) que levantaron el templo de Ampurias trabajaron bajo esquemas muy concretos, pero su obra tuvo que poseer forzosamente la personalidad, el sello, que sólo esa *officina* podía imprimir.

Anestesiología

Aunque parte esencial del trabajo del anestesista es conseguir que el paciente no sienta dolor, constituye también función primordial suya el mantenimiento de la estabilidad de las funciones vitales

Peter M. Winter y John N. Miller

Todavía no hace 140 años, antes del desarrollo de la anestesia, el trabajo de los cirujanos se limitaba a practicar amputaciones, reducir fracturas y reparar heridas superficiales. La principal característica de un buen cirujano era su rapidez: una pierna debía amputarse en 25 segundos. No existía medio satisfactorio alguno para reducir el dolor y la angustia de ciertos actos quirúrgicos; por ello, la práctica de intervenciones intrabdominales, intratorácicas y neuroquirúrgicas se consideraba imposible.

Los cimientos para la introducción de agentes anestésicos eficaces comienzan a ser realidad en el último cuarto del siglo XVIII. Joseph Priestley y Antoine Lavoisier descubren el oxígeno en la década de 1770. Humprey Davy pública, en 1808, sus estudios sobre el óxido nitroso ("gas hilarante") y menciona sus posibilidades en cirugía. El éter y cloroformo se conocieron en la práctica médica en 1831, pero, curiosamente, fueron primero los dentistas los que los utilizaron como anestésicos. Así, fue un dentista, W. T. G. Morton, quien demuestra la efectividad quirúrgica de un anestésico general. En 1846, en el Hospital General de Massachusetts, Morton administra éter a Gilbert Abbott, dejando al paciente inconsciente para que el cirujano John Collins Warren le extirpase un tumor de cuello.

Desde entonces, la transformación de la cirugía y el desarrollo de la anestesiología han experimentado cambios rápidos y profundos. Actualmente, aunque conseguir que el paciente permanezca insensible al dolor durante el acto quirúrgico constituye un requisito obvio, este elemento supone sólo una parte parcial del trabajo del anestesiólogo. Su actividad principal radica en mantener en equilibrio las funciones de los órganos vitales, contrarrestando las alteraciones provocadas por la cirugía, la enfermedad del paciente y los agentes anestésicos. El anestesista vigila y ajusta atenta y permanentemente los parámetros clínicos que reflejan las funciones de los sistemas vitales del paciente: frecuencias cardiaca y respiratoria, volúmenes respiratorios, presión arterial, equilibrio ácido-base de la sangre, niveles de oxígeno y dióxido de carbono en sangre, temperatura, función renal y otros signos que reflejan el funcionamiento de los órganos vitales.

Quizá resulte adecuado describir ese proceso valiéndonos de un ejemplo. Una mujer sana, de edad media, va a someterse a una cirugía de la vejiga en cualquier moderno hospital. La técnica anestésica puede practicarse directamente o bajo la supervisión de un médico anestesista, con un mínimo de tres años de especialización en anestesia, posteriores a la obtención de la licenciatura en medicina.

La misión del anestesista comienza la víspera de la intervención, pues se ha comprobado que los enfermos que han sido informados e instruidos adecuadamente sobre el tipo de cirugía que se les va a practicar presentan menos complicaciones febriles postoperatorias, y la estancia en el hospital es más breve. En su visita, el anestesista obtiene una información completa sobre la paciente, su enfermedad, otros problemas médicos, medicación que esté tomando, a la par que le informa de los puntos referentes a la cirugía y anestesia y comprueba el grado de ansiedad que presenta. También debe atender el interrogatorio del paciente en lo que concierne al procedimiento quirúrgico, evolución postoperatoria y complicaciones potenciales, respondiéndole en los términos adecuados; amén de solicitar su participación en los cuidados postoperatorios. Durante ese tiempo, el anestesiólogo decidirá también la técnica anestésica que considera más apropiada en función del tipo de cirugía, patología del paciente y su experiencia personal.

El día de la operación, el anestesiólogo comienza su labor preparando y revisando los aparatos y monitores adecuados y necesarios para obtener una correcta información de las funciones vitales. La información deberá obtenerse con una frecuencia y grado de fiabilidad tales que permitan un control del estado del enfermo en todo momento.

Para el seguimiento mínimo del paciente deberá contarse con un fonendoscopio, colocado sobre el tórax o insertado en el esófago (después de la inducción de la anestesia), que permitirá controlar las frecuencias cardiaca y pulmonar; un esfignomanómetro, para medir la presión arterial; un termómetro intraesofágico; un estimulador eléctrico (para control de la función muscular) y un electrocardiograma visualizado continuamente en un osciloscopio. Es imprescindible, además, canular una vena (o más de una) para la administración de medicamentos, soluciones electrolíticas y, si fuera necesario, transfundir sangre.

En situaciones más complejas, por cirugía más invasiva o presentar el paciente patología cardiaca grave, el anestesista quizá coloque un catéter en una arteria (para el control directo de la presión arterial y del funcionamiento de los pulmones) y otro catéter en la aurícula derecha o en la arteria pulmonar (que transporta la sangre desde el ventrículo derecho del corazón hasta los pulmones). La colocación de elec-

1. ANESTESIA GENERAL aplicada a la cirugía. Se utilizó por primera vez en 1846, en el Hospital General de Massachusetts, hecho que plasmó, años más tarde, Robert Hinckley, en el lienzo que se conserva en la Biblioteca Countway de Boston. Al paciente, Gilbert Abbott, se le extirpó un tumor de cuello. A su espalda aparece el dentista W. T. G. Morton, que fue quien administró la anestesia, valiéndose de una esponja empapada en éter alojada en un recipiente. El cirujano era John Collins Warren.

trodos en la cabeza del paciente nos permitirá registrar la actividad del cerebro a través de un electroencefalograma. Las señales de todos esos monitores pueden procesarse y registrarse en forma digital o analógica, para su utilización inmediata o para un estudio posterior de la fisiología del paciente.

Un paso habitual, preliminar a la inducción de la anestesia general, es administrar al paciente oxígeno (O_2) al 100 por ciento con mascarilla durante un tiempo breve. El oxígeno, al desplazar al nitrógeno (N_2) pulmonar, permite alargar (de treinta segundos a dos minutos) el tiempo durante el cual puede mantenerse al paciente sin respirar, lo cual facilita la intubación endotraqueal.

Para administrar la anestesia, el médico dispone de dos tipos de drogas. El primer grupo comprende los agentes que actúan rápidamente, aunque por breve tiempo. Estos fármacos, por su rapidez de acción, pues se administran por vía endovenosa, facilitan el control de las vías aéreas del paciente. Cabría utilizarlos en el mantenimiento de la anestesia, pero, por varias razones, la principal de ellas que la administración de dosis frecuentes puede tener efectos tóxicos, resultan, en este sentido, menos útiles que los fármacos del segundo grupo.

Se emplean estos otros fármacos para mantener el estado de anestesia. Comprende el grupo todos los agentes anestésicos inhalatorios (gases o líquidos volátiles), así como los relajantes musculares de larga duración, los morfínicos y algunos otros. En general, el comienzo de la acción de estas drogas es más lento, y deben administrarse cuando se prevé el declive de los efectos de los agentes utilizados en la inducción.

Volviendo al ejemplo de la paciente sometida a cirugía de la vejiga, el anestesista procede con las drogas del primer grupo a través de cuatro etapas. Primero, administra una pequeña dosis de un relajante muscular, como el curare, para prevenir el dolor provocado por las contracciones musculares inducidas por la dosis paralizante de succinilcolina, que se utilizará posteriormente.

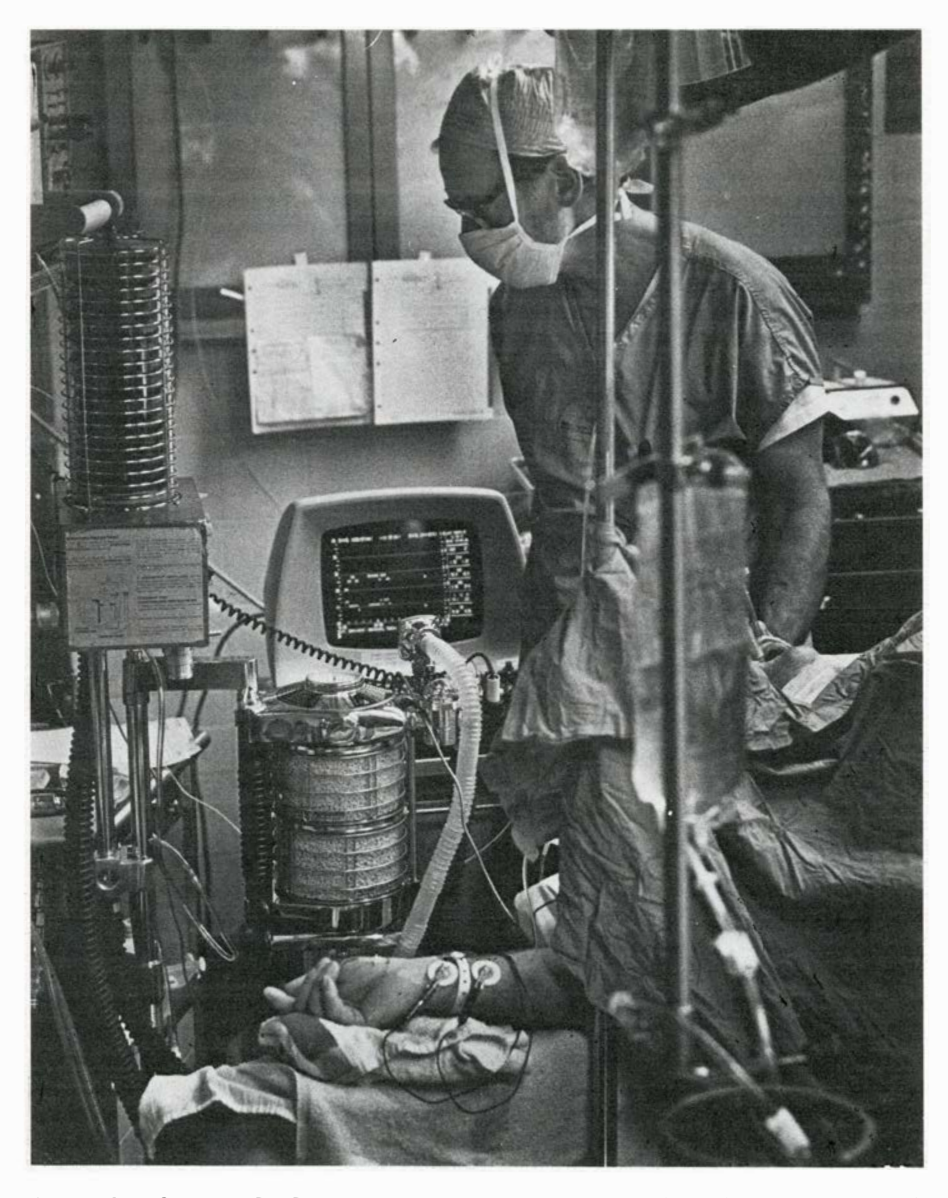
En segundo lugar, el anestesista inyecta una pequeña dosis de un barbi-



túrico de acción rápida (por ejemplo, pentotal sódico) para valorar el grado de depresión sanguínea y de la conciencia que una dosis posterior pueda inducir. La administración de pentotal sódico (alrededor de tres miligramos por kilogramo de peso corporal) es el tercer paso. Este fármaco, al distribuirse rápidamente por todo el cuerpo, mantiene la anestesia durante pocos minutos.

Inmediatamente después se administra una dosis paralizante de succinilcolina, que actúa en breves minutos y relaja todos los músculos esqueléticos. Esta relajación profunda es conveniente para que el anestesiólogo introduzca un tubo en la tráquea, a través del cual el paciente respira durante la intervención. Resulta necesario este paso porque los relajantes musculares y anestésicos inhalatorios que se le administrarán posteriormente impiden la respiración espontánea del paciente. Una vez que el tubo endotraqueal se ha introducido, el anestesista insufla un manguito elástico, colocado en la parte inferior del tubo, para conseguir un adecuado adosamiento de dicho tubo a la pared traqueal. Tal acoplamiento del tubo endotraqueal evita que el contenido del estómago llegue a los pulmones (complicación muy grave), a la par que permite al anestesista controlar la respiración del paciente insuflando los pulmones con presión positiva intermitente.

Cumplidos estos cuatro pasos de la inducción anestésica, se inicia el mantenimiento farmacológico de la anestesia adecuada al acto quirúrgico. En primer término, se conecta el tubo endotraqueal al aparato de anestesia, el cual suministra al paciente una mezcla de óxido nitroso (N_2O) y oxígeno (O_2). Al abolir tanto la anestesia como la cirugía la función pulmonar, la concentración de oxígeno en la mezcla rara vez es inferior al 30 por ciento (lo que constituye un aumento del 50 por ciento respecto de la cantidad de oxígeno del aire normal). En este caso, puesto que se trata de cirugía sobre abdomen superior, utilizaríamos oxígeno al 50 por ciento, para tener un mayor margen de seguridad contra posibles complicaciones respiratorias.

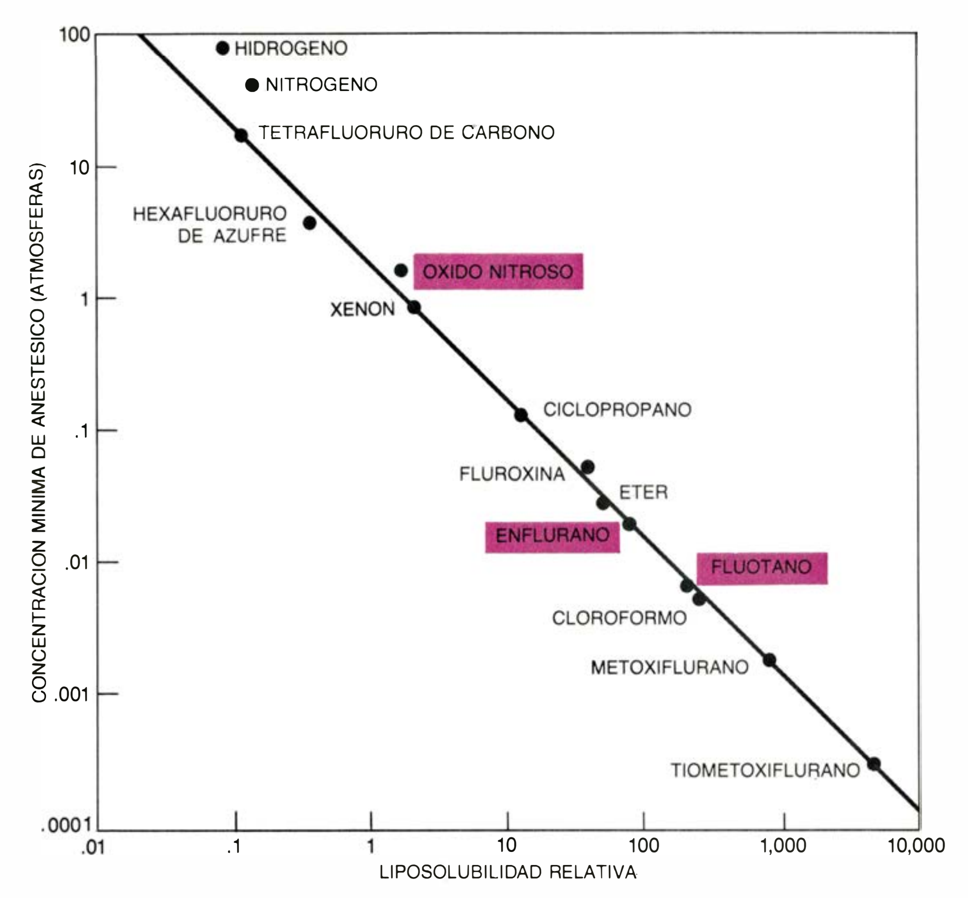


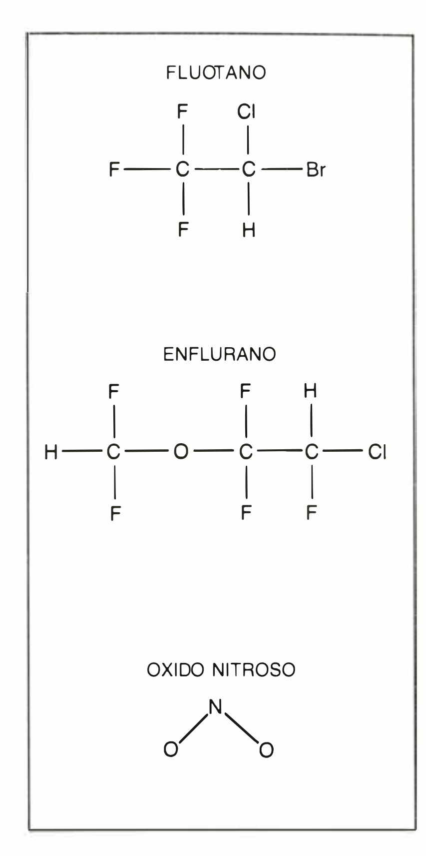
2. UN EQUIPO DE ANESTESIA emplea los aparatos mostrados en esta fotografía, tomada en el Hospital Clínico de la Universidad de California en San Francisco. La máquina cilíndrica de la izquierda, con un panel de instrucciones, es el aparato de ventilación, que mantiene la respiración del paciente. La pantalla situada a su derecha registra los datos que emanan de un espectrofotómetro de masas; da información de la concentración de gases y anestésicos en los pulmones. El aparato cilíndrico colocado por debajo suyo es un recipiente de cal sodada, que absorbe el anhídrido carbónico exalado por el paciente a través del ventilador. Los dos electrodos colocados en la muñeca del paciente sirven para estimular los nervios periféricos y determinar los efectos de los relajantes. El anestesista es John W. Severinghaus.

Pronto advirtieron los cirujanos del siglo XIX que el óxido nitroso no era suficientemente potente para producir una anestesia quirúrgica adecuada. A la presión de una atmósfera, una mezcla del 50 por ciento de óxido nitroso sólo aporta el 50 por ciento de los requerimientos anestésicos. Debe, por tanto, suplementarse este gas con otro agente más potente. Los más comúnmente utilizados son: fluotano, enfluorano e isofluorano, moléculas orgánicas que contienen los halógenos bromo, cloro y flúor. Ejercen efectos acusados sobre los sistemas cardiovascular y pulmonar, disminuyendo el gasto cardiaco, la presión arterial, las resistencias vasculares periféricas y el volumen ventilatorio. Deben, por tanto, administrarse dichos anestésicos con gran precisión. Variaciones del orden de sólo una fracción del uno por ciento pueden provocar graves alteraciones de las funciones vitales. En pacientes con acusada patología cardiaca u otros cuadros patológicos, pueden sustituirse por grandes dosis de morfínicos.

Antes de la incisión quirúrgica el paciente recibe una dosis paralizante de curare para provocar una buena relajación de los músculos abdominales y facilitar un buen acceso del cirujano al campo quirúrgico. Puesto que también los músculos respiratorios se paralizan, la respiración del paciente suele controlarse por medio de un ventilador mecánico conectado al circuito respiratorio.

El lugar de acción de los relajantes musculares es la sinapsis: la unión entre nervio y músculo. En condiciones normales, el estímulo electroquímico recorre rápidamente el nervio motor hacia la sinapsis, donde provoca la liberación de acetilcolina, que atraviesa la hendidura sináptica y estimula la contracción muscular. Curare y succinilcolina, si





3. POTENCIA DE LOS ANESTESICOS, correlacionada con su liposolubilidad. Una medida de su potencia es la mínima concentración requerida para abolir los movimientos provocados por un estímulo doloroso. La correlación lineal entre liposolubilidad y potencia anestésica implica que el lugar de acción de un anestésico es la membrana lipídica de la célula. Tres de esas sustancias (*color*) se utilizan como anestésicos. El hidrógeno y el nitrógeno se desvían de la pendiente lineal mostrada por las otras sustancias, pues son agentes tan débiles que, para que induzcan anestesia bajo condiciones experimentales, deben administrarse a presiones altas, y la presión contrarresta el efecto anestésico. Se representa a la derecha la estructura química de los tres anestésicos de uso más frecuente; sus átomos constituyentes son flúor (*F*), cloro (*Cl*), carbono (*C*), bromo (*Br*), hidrógeno (*H*), nitrógeno (*N*) y oxígeno (*O*).

bien por mecanismos distintos, provocan ambos la parálisis interfiriendo la acción de la acetilcolina.

Tan pronto queda el paciente anestesiado, el cirujano puede comenzar la intervención quirúrgica. Durante su curso, el anestesista compensa en el paciente las alteraciones de los sistemas vitales provocados por la cirugía y la anestesia.

Al aproximarse el final del acto quirúrgico, el anestesista debe prepararse para invertir o eliminar los efectos de todas las drogas que haya utilizado. Tal proceso es tan complejo y peligroso como lo fue la inducción de anestesia. Los músculos paralizados deben recuperar su tono para que el paciente respire espontáneamente sin dificultad. Los diversos fármacos utilizados para abolir la conciencia y el dolor deben eliminarse o contrarrestarse adecuadamente, y en el orden correcto. Deben comprobarse el volumen y la composición de la sangre para asegurarse de que son normales. Finalmente, el paciente debe estar lo suficientemente despierto para responder a las indicaciones del personal especializado de enfermería de las salas de despertar.

Este protocolo conlleva, en parte, la administración de diversos fármacos para contrarrestar los efectos de los anestésicos. Por ejemplo, la acción de los relajantes musculares se antagoniza con drogas como la neostigmina, que restablece la acción de la acetilcolina en la sinapsis entre nervio y músculo. En otras circunstancias, el anestesista no debe más que comprobar la actividad de procesos naturales, por ejemplo, que los anestésicos inhalatorios se eliminan de la circulación por respiración.

La cirugía sobre la vejiga resulta, a menudo, un acto quirúrgico simple. Los cuidados y medidas terapéuticas antes citados son los mismos, aunque más complejos de aplicar, en pacientes de alto riesgo. De entre los primeros citemos la resección y remplazamiento de vasos sanguíneos en personas de edad avanzada, las cardiopatías congénitas de los niños lactantes (en los cuales la cirugía requiere detener el corazón), operaciones en pacientes a los que se les administra una variada medicación para tratar enfermedades no relacionadas, en politraumatizados o personas que sufren lesiones en varios órganos. Quizás el ejemplo más extremo sea el paciente sometido a trasplante de hígado. A menudo presenta insuficiencia hepática con importantes repercusiones en otros sistemas orgánicos. El acto quirúrgico puede durar 24 horas o más y requiere a veces la trasfusión de 150 litros de sangre (35 veces el volumen sanguíneo normal).

De la capacidad del anestesista para mantener el equilibrio fisiológico frente a varios y simultáneos factores desequilibrantes cabe deducir que se sirve de una clase de cuidados médicos cualitativamente diferentes. Gran parte de la práctica médica se fundamenta en la prescripción: el médico emite un diagnóstico, prescribe un tratamiento y al cabo de un intervalo variable (días) reexamina al paciente para comprobar los resultados de la terapia. El médico anestesista actúa titulando los efectos de la cirugía y los anestésicos. La medición continua de las diferentes constantes vitales y su interdependencia le permite realizar los ajustes adecuados. Su habilidad práctica sustituye a los meca-

nismos homeostáticos para mantener un balance fisiológico adecuado.

El logro de dichos objetivos depende fundamentalmente de la fiabilidad de las mediciones que expresan el funcionamiento de cada sistema orgánico. Este hecho explica el que la anestesia y cirugía modernas presenten una alta dependencia de la instrumentación de refinada tecnología. Ello explica también por qué la cirugía más avanzada y radical resulta más costosa, se precisan personal y técnicas altamente cualificados. Estos medios, que permiten valorar la eficacia de la acción farmacológica frente a la patología de la enfermedad, rozan a veces los límites de la toxicología. Cabe destacar que estas prácticas se siguen en Occidente con una mortalidad aproximada de uno por cada 10.000 pacientes.

Aunque la técnica anestésica que hemos descrito para la cirugía vesical de una mujer es el método más común, existen otros. Una excelente analgesia quirúrgica puede alcanzarse igualmente con el empleo de técnicas regionales. Así, la administración de anestésicos locales, como lidocaína y tetracaína, puede bloquear la propagación de estímulos nerviosos al cerebro a partir de estructuras distantes. También puede el médico insensibilizar al paciente que sufra una fractura inyectándole un anestésico local cerca de los nervios que pasan por el cuello o la axila.

De modo similar, los anestésicos locales inyectados cerca de los cordones espinales por diversos métodos insensibilizan al dolor distintas estructuras orgánicas, según el nivel que alcance la difusión del anestésico. Esta técnica ha revolucionado el parto y el período de alumbramiento del niño. Hasta hace unos 15 años, el parto se caracterizaba por dolores incontrolabes o difíciles de aliviar. La razón de ello era que los anestésicos inhalatorios o narcóticos, si bien útiles para reducir el dolor materno, atraviesan la placenta, por lo que pueden producir la depresión de funciones vitales del feto. La analgesia regional aporta un excelente alivio del dolor abdominal y pélvico; la madre permanece despierta, participando y disfrutando del proceso del parto y del nacimiento del niño. Los anestésicos locales utilizados en esta técnica son relativamente no tóxicos; sólo pequeñas cantidades alcanzan al feto, por lo que sus funciones vitales no se resienten.

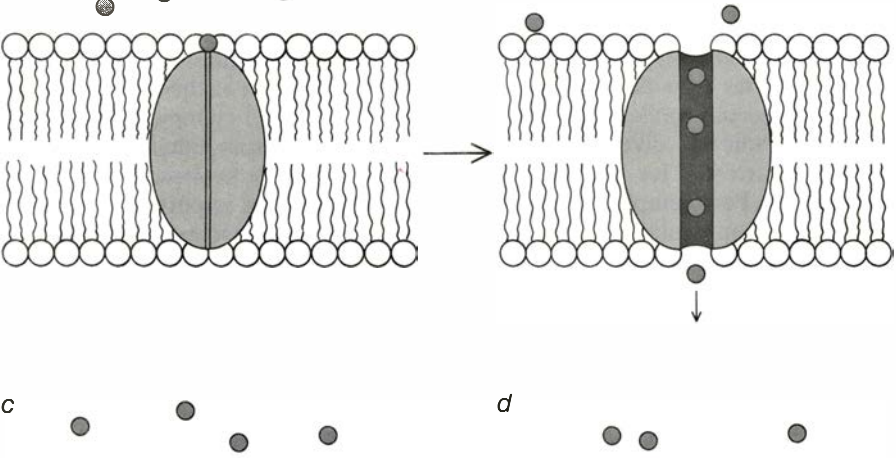
La experiencia adquirida en el tratamiento del dolor ha conducido al anestesista a extender sus actividades a otras áreas de la clínica e investigación médica, que guardan poca relación con la cirugía; verbigracia, el tratamiento del dolor crónico, la medicina de cuidados intensivos, las investigaciones sobre el modo de acción de los anestésicos y las técnicas de submarinismo a grandes profundidades.

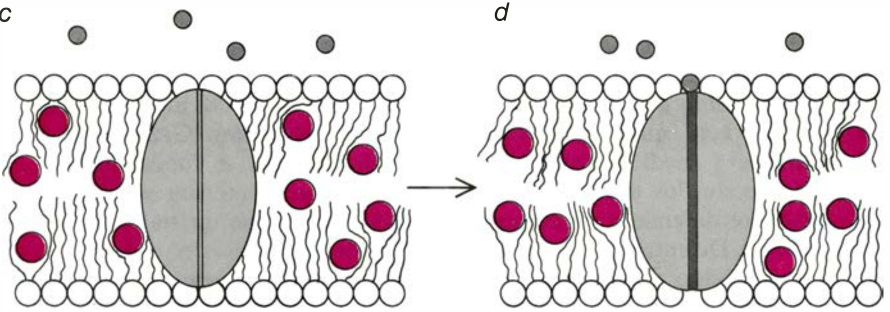
Se calcula que, en Estados Unidos, el dolor crónico de intensidad suficiente para que se resientan la capacidad laboral y el disfrute de la vida aflige a unos 35 millones de habitantes. Los tipos de dolor varían ampliamente, yendo desde cefaleas intratables a dolores fantasmas que parecen proceder de un miembro amputado. El dolor crónico tiene su origen muchas veces en un grupo de síndromes, por lo que el tratamiento de los pacientes debe realizarlo conjuntamente un grupo de especialistas: anestesistas, neurólogos, neurocirujanos, internistas, psiquiatras y otros.

Otra subespecialidad del anestesista son los cuidados de los pacientes en estado crítico. Estos, dado que presentan una insuficiencia simultánea de varias funciones vitales, requieren también una asistencia y vigilancia continuas. Por ejemplo, un paciente afecto de parálisis neuromuscular aguda, o que presente múltiples lesiones traumáticas, debe cuidarse y atenderse de modo muy similar al paciente anestesiado, si bien el tratamiento intensivo puede durar varios días o semanas. Otros tipos de cirugía, como son la cardiaca y la de trasplantes, son intervenciones que tienen un mayor impacto sobre la homeostasis de los órganos vitales, necesitando por ello unos cuidados intensivos de larga duración. En este campo, el anestesista trabaja en colaboración con otros especialistas.

A pesar de que se administran anestésicos a millones de pacientes cada año, los mecanismos farmacológicos que producen la pérdida de conciencia y la analgesia se conocen mal. Una mayor comprensión contribuiría al descubrimiento de anestésicos mejores, así como al conocimiento del mecanismo de acción de drogas de gran consumo, como el alcohol y los barbitúricos.

¿Cómo actúan los anestésicos? La morfina, la codeína, la heroína y otras drogas con propiedades anestésicas tienen estructuras moleculares que encajan en los sitios receptores ubicados en la superficie de las células, de modo similar a como una llave encaja en su cerradura. No vale esa explicación para los anestésicos inhalatorios, pues su estructura molecular varía ampliamente, desde los gases nobles, como el nitró-





4. LA ANESTESIA puede tener su origen en el bloqueo de la transmisión de los impulsos nerviosos por la acción de los anestésicos sobre la membrana lipídica de la célula. En una célula en reposo (*a*) los iones sodio (*gris claro*) se encuentran fuera de la célula. Cuando llega una señal electroquímica, en la membrana proteica de la célula (*b*) se abre un canal que permite a los iones sodio penetrar a su través al interior de la célula. Cuando las moléculas de un anestésico inhalatorio (*color*) se disuelven en la membrana (*c*), los canales no se abren ante la llegada de un nuevo impulso (*d*) y se bloquean los iones sodio. La membrana puede cambiar de fluidez, volumen o ambas características. (Los dibujos son obra de Ilil Arbel.)



5. EQUIPO DE MORTON para la administración de la primera anestesia quirúrgica: un recipiente con una esponja empapada en éter. Abbott inhalaba a través de una pieza bucal, situada a la derecha, forzando el paso del aire sobre la esponja, con lo que arrastraba el vapor de éter. Afortunadamente, el anestésico tenía gran margen de seguridad, y Abbott sobrevivió a pesar de la elementariedad del equipo.

geno y el argón, a complejos hidrocarbonados halogenados, como el fluotano y enfluorano.

A pesar de ello, algo se sabe de los principios básicos de la acción de esos anestésicos. Se advirtió ya en el siglo XIX que la potencia de un anestésico guarda una estrecha relación con su solubilidad en los lípidos: a mayor solubilidad, más potencia anestésica y menor concentración requerida para producir la anestesia. Aunque tal relación no explica cómo actúan los anestésicos, sugiere que su efecto se ejerce sobre la membrana lipídica de las neuronas. La hipótesis comúnmente aceptada es que los anestésicos se disuelven en los lípidos de la membrana y, bien actuando sobre los lípidos, o bien sobre complejos proteicos, cambian la fluidez o el volumen de la membrana.

La hipótesis ha ganado mayor apoyo desde que se conoce el destacable fenómeno del antagonismo de presión. La aplicación de altas presiones, como se ha demostrado en nuestro laboratorio y en otros, anula los efectos de los anestésicos. La acción es lineal y cuantitativamente predecible, a despecho de la potencia del anestésico implicado. Por ejemplo, si se anestesia un ratón con fluotano en una cámara de alta presión, recupera su estado normal preanestésico al aumentar la presión 50 atmósferas. La administración de una cantidad adicional de anestésico puede antagonizarse por un incremento de presión altamente previsible. Ninguna otra acción farmacológica o manipulación física conocidas satisfacen este antagonismo.

El fenómeno antagónico de la presión se ha demostrado en todos los anestésicos inhalatorios y en otros gases no considerados anestésicos. Uno de ellos es el nitrógeno, que constituye el 79 por ciento del aire normal. La solubilidad del nitrógeno en los lípidos sugiere que podría inducir la anestesia a una presión de 28 atmósferas. De hecho, la narcosis provocada por el nitrógeno ("borrachera de las profundidades"), experimentada por los submarinistas, constituye sólo una leve anestesia provocada por la cantidad de nitrógeno que respiran. El aire que se toma a 50 metros de profundidad bajo el mar contiene una cantidad de nitrógeno igual a aproximadamente el 15 por ciento de la dosis anestésica de óxido nitroso o fluotano.

Este efecto dificulta el buceo a grandes profundidades, por lo que suele sustituirse el nitrógeno por helio en el suministro de aire a los buzos. De acuerdo con su solubilidad en lípidos, el helio debería ser anestésico a presiones de 80 atmósferas, aproximadamente. Sin embargo, el helio constituye una excepción a la correlación entre potencia anestésica y solubilidad en lípidos: no produce anestesia a ninguna presión. Por el contrario, induce el estado opuesto al de la anestesia: desencadena la excitación del sistema nervioso central, con temblores que evolucionan a ataque epiléptico. Es importante resaltar que tanto el antagonismo anestésico como la excitación del sistema nervioso se deben a la presión, y no al helio.

En resumen, producen anestesia agentes de potencias diversas. La potencia de un determinado agente depende de su liposolubilidad. Con agentes relativamente potentes, como el fluotano, basta una concentración del uno por ciento en la atmósfera para producir el estado anestésico. El óxido nitroso, menos liposoluble, requiere alrededor de una atmósfera para producir anestesia. El nitrógeno queda todavía por debajo de la escala, pues su liposolubilidad predice una dosis de 28 atmósferas de nitrógeno para producir la anestesia.

Apoyados en estos hallazgos podemos emitir una hipótesis que relacione sin solución de continuidad la conducta con el volumen crítico de una membrana lipídica. (El concepto de volumen es una simplificación de los cambios, mucho más complejos, que tienen lugar en la membrana.) A unas dimensiones normales de la membrana corresponde una conducta normal. La compresión de la membrana por un aumento de la presión ambiental reduce su volumen, lo que se correlaciona con una excitación del sistema nervioso central que conduce a las crisis epilépticas. Si se disuelven en la membrana moléculas de anestésico, se produce una expansión del volumen de la membrana, y anestesia. Cuanto más soluble es el anestésico, menor es la cantidad requerida. Si se aplica presión, el volumen de la membrana vuelve a la normalidad, con lo que se recupera la conducta, pese a la presencia del anestésico.

Esta interpretación de los hechos tiene importantes implicaciones en actividades que se apartan del campo de la asistencia al paciente: buceo en aguas profundas y explotación de yacimientos petrolíferos en alta mar. Ya se ha mencionado que en el buceo se evita la narcosis por nitrógeno respirando mezclas de helio y oxígeno. A medida que aumenta la profundidad, aparece en los buzos una excitación del sistema nervioso central. Ello limita la profundidad a la que puede desempeñarse un trabajo, particularmente en la explotación de yacimientos petrolíferos marinos.

En el Hospital Clínico de la Universidad de Duke, Peter B. Bennett y uno de los autores (Miller) analizaron ese

problema en un estudio reciente. Un grupo de voluntarios pasó cuatro días encerrado en un complejo de cámaras sometido a presiones equivalentes a unos 760 metros de profundidad bajo el mar (69 atmósferas). Los cálculos efectuados previamente indicaban que, añadiendo un 25 por ciento de una dosis anestésica, el volumen de la membrana se mantendría normal. El "anestésico" más seguro en este caso era el nitrógeno. De acuerdo con ello, la mezcla gaseosa respiratoria tenía helio, nitrógeno y oxígeno, en proporciones del 89, 3, 10 y 7 por ciento, respectivamente. Los voluntarios no sufrieron la fase de excitación que habría aparecido utilizando una mezcla gaseosa convencional de helio.

Sin embargo, el problema no está resuelto; la densidad del gas altamente comprimido aumenta el trabajo ventilatorio y puede limitar la profundidad a la que descienden los buzos. Cerca de la mitad de la densidad de la mezcla gaseosa respiratoria se debía al nitrógeno. La limitación de profundidad impuesta por la densidad del gas podría minimizarse sustituyendo el nitrógeno por un anestésico más potente, como el óxido nitroso (en cantidades mucho más pequeñas).

Queda otro aspecto de la investigación en anestesia, de gran importancia. Hemos demostrado, en experiencias realizadas con Edmond I. Eger II y Raymond Smith, que la inhalación de anestésicos causa efectos farmacológicos muy similares a los producidos por el alcohol y otros sedantes, como los barbitúricos. En animales de experimentación provocan tolerancia y síndromes de abstinencia que son, cuantitativa y cualitativamente, similares a los que producen esas drogas. Más aún, hemos comprobado que la tolerancia al alcohol produce una tolerancia cruzada con los anestésicos. Estos hallazgos sugieren fuertemente un mecanismo similar o un lugar de acción común (o ambos) para los dos grupos de drogas.

El alcohol y otros hipnóticos sedantes son las drogas con un mayor consumo abusivo, con un coste incalculable tanto para el adicto como para la sociedad. En las investigaciones sobre el alcohol resulta difícil correlacionar aspectos de la conducta con concentraciones de la droga. Este problema se resuelve en gran medida usando anestésicos inhalatorios como sustitutos. Prevemos que los anestésicos inhalatorios desempeñarán un importante papel en el estudio de estos problemas, de gran trascendencia social.

La turbina de vapor de Parsons

Inventada en 1884 por Charles A. Parsons, hijo de un aristócrata científico, revolucionó la navegación y la generación de energía eléctrica. Todavía están en uso muchas innovaciones que introdujo

W. Garrett Scaife

A finales de la última centuria la revolución industrial había alcanzado una fase decisiva. A lo largo del siglo y medio anterior, las máquinas de vapor habían posibilitado el empleo de energía química de algunos combustibles en múltiples ingenios mecánicos. Por señalar uno de sus usos más importantes, la máquina de vapor se había coaligado con otro avance técnico, la dinamo eléctrica, permitiendo la obtención de grandes flujos de energía eléctrica. Con la demanda de energía aumentaba también el tamaño de las máquinas de vapor, hasta que empezaron a frisar sus limitaciones mecánicas. Si el desarrollo industrial debía continuar, era necesaria una nueva fuente de energía.

En 1884, Charles Algernon Parsons proporcionó esa fuente desarrollando el primer turbogenerador práctico del mundo. Dedicó los diez años siguientes a la aplicación de su invención al transporte; años de intenso trabajo que fueron coronados por el éxito cuando el *Turbinia*, su barco impulsado por turbinas, alcanzó la velocidad de 35 nudos. Una velocidad considerablemente mayor que la máxima de cualquier embarcación de la Royal Navy de esa época. Las turbinas eran más compactas que las máquinas de vapor de pistones, o alternativas, y más simples. Por tanto, conforme crecieron en tamaño y rendimiento, fueron sustituyendo a los anteriores tipos de máquinas. Las turbinas constituyen hoy la mayor fuente de energía eléctrica del mundo, aunque el avance del motor diesel acabara con el monopolio en la propulsión de barcos de pasajeros que ostentaron durante la primera mitad de nuestro siglo. La turbina de vapor actual incorpora todavía características desarrolladas por Parsons en 1884.

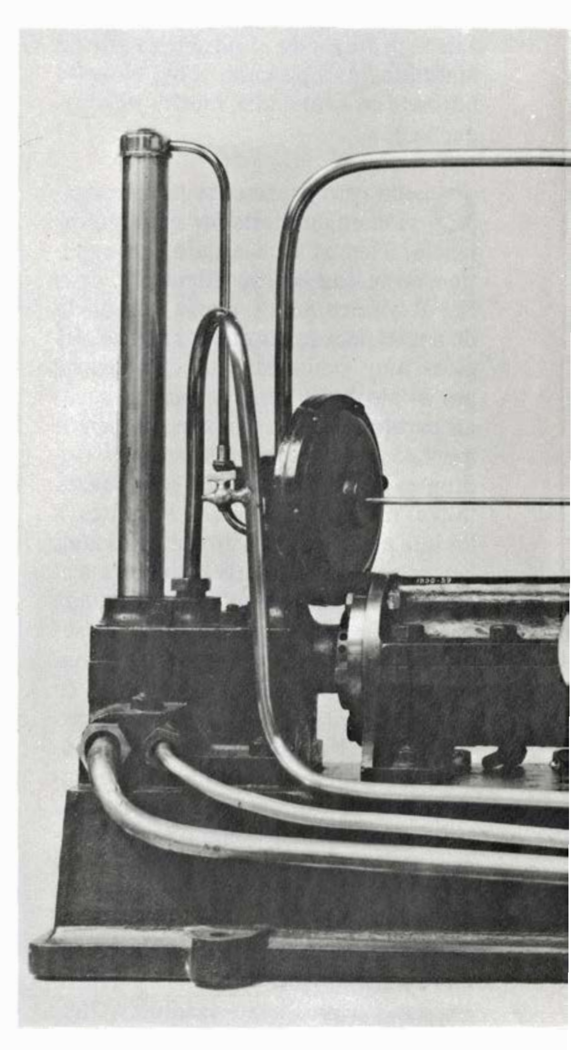
Los dos principios en que descansa la turbina de vapor, la reacción y la deflexión, hunden sus raíces en la antigüedad. Alrededor del 130 a.C., Herón de Alejandría describió una máquina llamada eolipilo. Esta esfera hueca, llena de vapor, tenía dos asas, huecas también, en lados contrarios, curvadas de forma que apuntaran a tangentes opuestas de la esfera. El vapor en expansión salía a chorro de las dos asas y hacía girar a la esfera por reacción mientras el vapor aceleraba.

El otro principio utilizado en las turbinas, la deflexión, se demostró en una máquina propuesta por Giovanni Branca en 1629. En la máquina de Branca, un chorro de vapor hacía girar una rueda de palas de forma semejante a las hidráulicas.

Las turbinas de vapor incorporan estos dos efectos. En una turbina, se dirige un chorro de vapor a alta presión contra un conjunto de palas similares a las de un ventilador. Al golpear las palas, el flujo de vapor se deflecta, induciendo el giro de las palas. El vapor se expande y acelera mientras fluye a través de los pasos que hay entre palas, convirtiendo la energía de presión en energía cinética.

Las primeras turbinas, como la de Branca, no hubieran sido capaces de producir ninguna potencia útil puesto que las calderas de vapor de la época no podrían aguantar suficiente presión. Las primeras máquinas de vapor útiles, desarrolladas por Thomas Savery, Thomas Newcomen y otros, no requerían vapor a alta presión. Antes bien, utilizaban vapor a baja presión para desplazar el aire situado bajo el pistón. El vapor se condensaba entonces, creando un vacío bajo el pistón; el peso de la atmósfera actuaba sobre él para proporcionar trabajo útil. Con el tiempo, la experiencia en la construcción y utilización de calderas para estas llamadas máquinas atmosféricas permitió a los ingenieros diseñar calderas capaces de mantener y resistir presiones muy por encima de la atmosférica.

La obtención de vapor a alta presión motivó que los inventores tornaran a pensar en la turbina. Los proyectistas idearon varios planos. En 1815, el ingeniero de locomoción Richard Trevithick trató de sujetar dos surtidores a los bordes de la rueda de una máquina de ferrocarril, alimentándolos con vapor de la caldera. El sistema de Trevithick falló. En 1837, William Avery construyó en Syracuse, estado de



1. TURBOGENERADOR DE PARSONS, construido en 1884: la primera turbina de vapor que funcionó. El vapor a alta presión entraba por la abertura rectangular (*centro del eje*). Allí se dividía

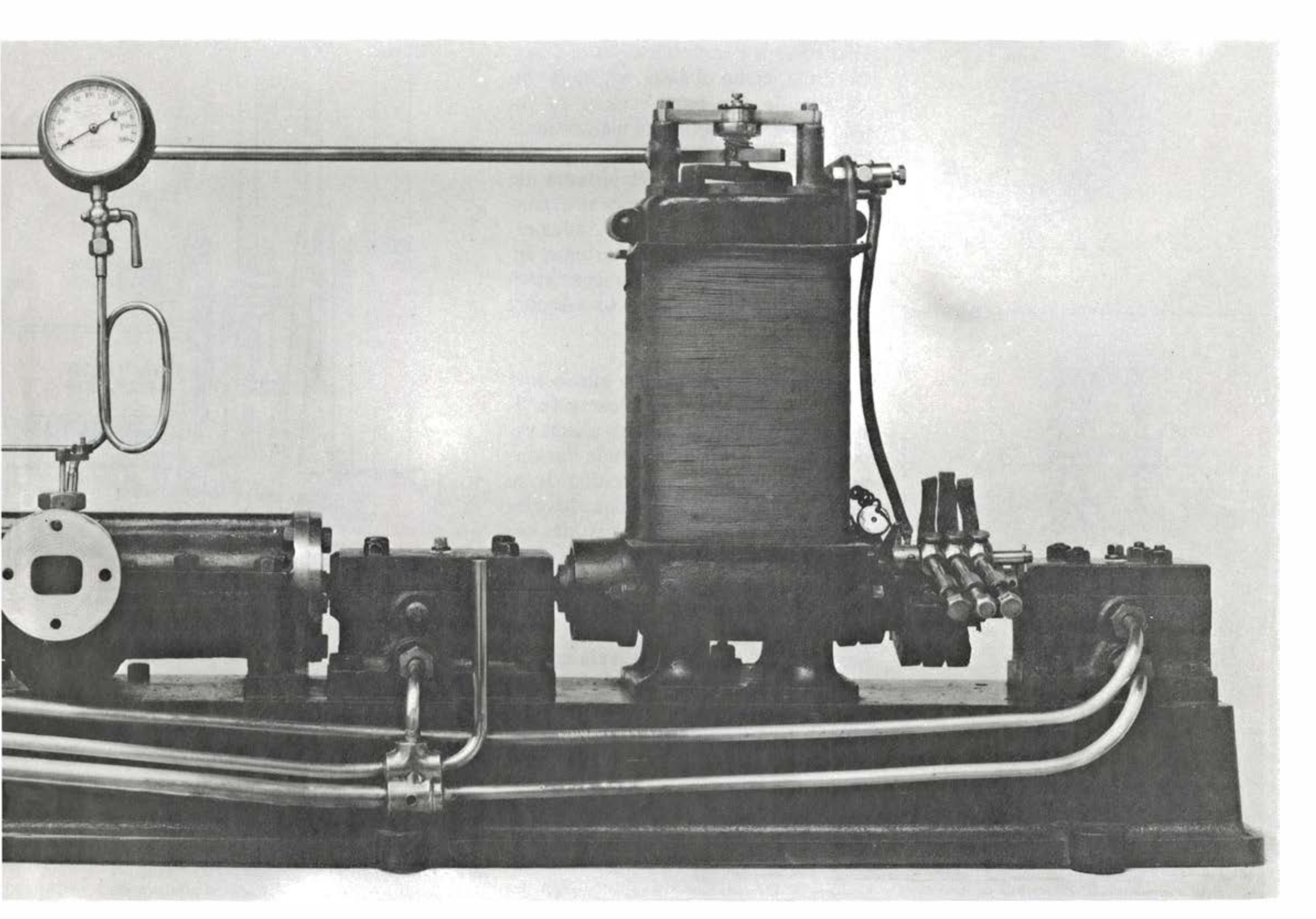
Nueva York, una serrería accionada por un aparato de reacción similar. Desde 1784 hasta 1884, sólo en Inglaterra, se concedieron más de 200 patentes relacionadas con turbinas, la mitad de ellas a partir de 1864.

Ninguno de estos esfuerzos produjo una máquina práctica. Esto se debió en parte a un fallo en la comprensión de las leyes físicas que rigen la expansión del vapor, que es mucho menos denso que el agua y mucho más elástico; en virtud de ambas características, las velocidades del fluido en las turbinas de vapor superaban de lejos las del agua, con las que estaban familiarizados estos diseñadores. Se había determinado que la velocidad de las palas tenía que ser por lo menos la mitad de la del fluido para que la turbina funcionara con un rendimiento razonable. Por tanto, las primeras turbinas alcanzaron velocidades de rotación excesivas.

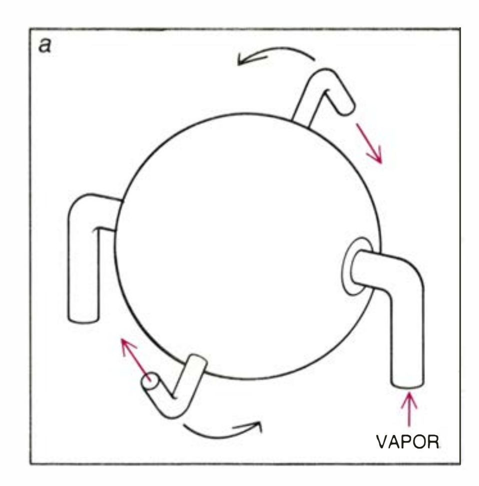
Las altas velocidades de rotación causaban varias dificultades, no siendo la menor de ellas la tendencia de las máquinas de rotación rápida a descontrolarse. Las velocidades de rotación podían haberse disminuido montando las palas de la turbina en ruedas de mayores diámetros. Pero no había manera de hacerlo. El chorro de vapor de las primeras máquinas era necesariamente pequeño, así que el área de la sección a través de la cual pasaba el vapor también tenía que ser pequeña. Las primeras turbinas experimentales poseyeron, pues, diámetros pequeños y palas cortas.

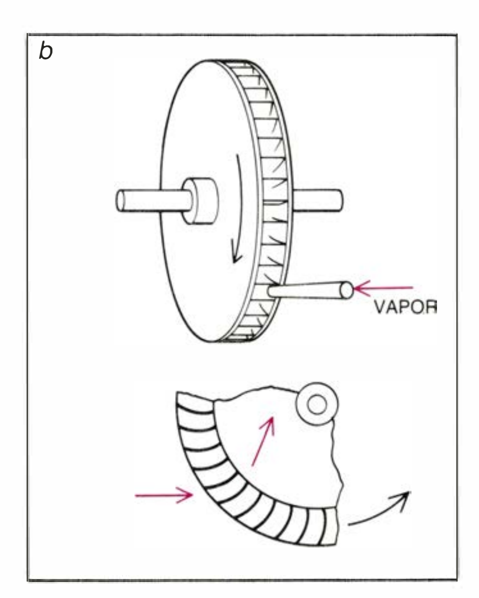
Otra propiedad problemática del vapor es el efecto umbral. Cuando un fluido compresible, como el vapor, es confinado a través de un conducto, la velocidad del flujo aumenta en proporción a la relación de las presiones de entrada y salida. Cuando la relación alcanza alrededor de dos a uno, el flujo alcanza un pico; nuevos incrementos de la relación de presiones no producen nuevos aumentos de la velocidad del fluido. Los primeros diseñadores fueron incapaces de sacarle todo el partido al vapor a alta presión, porque había un límite a la cantidad de energía de presión que podía convertirse en cinética para cederla a las palas. En 1889, el ingeniero sueco Carl Gustaf de Laval utilizó un conducto unido a una boquilla en forma de trompeta. Podía desarrollar velocidades mucho mayores y la velocidad de rotación de la máquina de Laval era también, en consecuencia, muy alta.

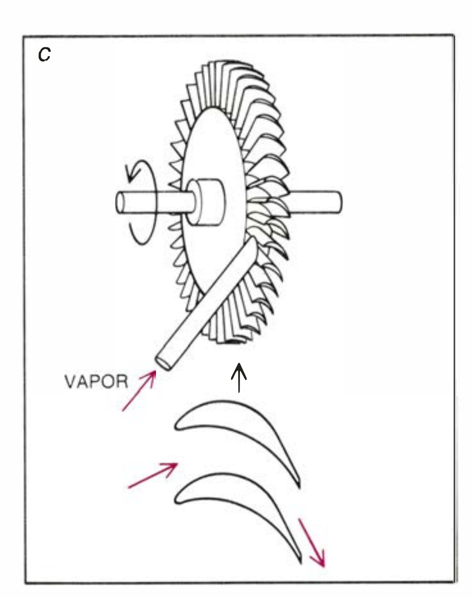
Para el diseño de la turbina, Parsons desarrolló un planteamiento radicalmente diferente, que le permitió reducir las altas velocidades de rotación aprovechando al mismo tiempo al máximo la energía del vapor a alta presión. Obvió el problema de la presión proyectando la expansión gradual del vapor al pasar a través de 15 pares de ruedas de palas. Cada par consistía en una rueda de palas "fijas", unida al interior de la carcasa de la turbina, y otra de palas "móviles", sujeta al eje de rotación [*véase la figura 5*]. Colocó las



en dos corrientes que fluían hacia cada extremo del eje a través de ruedas de palas. La expansión del vapor hacía girar las ruedas "móviles", unidas al eje central; éstas alternaban con ruedas "fijas", unidas al interior de la carcasa de la turbina. Las fijas dirigían el vapor de forma que chocara contra las caras de las palas móviles. El vapor se expandía al pasar por cada rueda. Al permitir que el vapor se expandiera en cascada, aprovechaba la energía contenida en la presión del vapor, eludiendo las altas velocidades de rotación necesarias en otras turbinas. El eje de rotación impulsaba una dinamo.







2. REACCION Y DEFLEXION son los dos principios en los que descansa el funcionamiento de la turbina de vapor. La reacción se mostraba en el eolipilo de Herón (*a*), en el que una esfera llena de vapor giraba inducida por chorros de vapor en expansión que salían de dos asas huecas. En (*b*) una rueda gira cuando las palas deflectan un chorro. Las palas de una turbina (*c*) desvían el flujo de vapor; éste se expande y acelera al pasar entre las palas, impulsándolas por la fuerza de reacción.

palas fijas y móviles en direcciones opuestas, esto es, si todos los grupos de palas estuvieran libres para girar, al pasar el vapor por el conjunto, provocaría que los dos tipos de rueda girasen en sentidos contrarios.

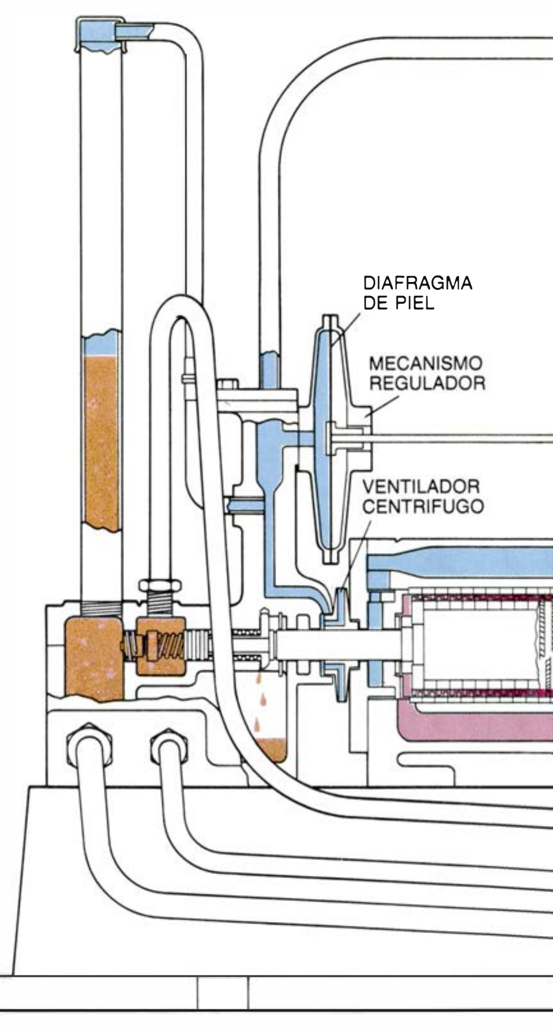
El vapor se expandía mientras atravesaba las palas fijas, acelerando el flujo; dirigido, golpeaba las caras de las palas móviles, haciéndolas girar por la fuerza de deflexión. En el interior de las palas móviles, el vapor se expandía de nuevo, saliendo de ellas en chorro acelerado y moviéndolas por la fuerza de reacción.

La cascada de ruedas con palas hacía innecesaria una velocidad de rotación exagerada. El vapor se expandía un poco en cada una de las 30 ruedas de la turbina de Parsons de 15 etapas, cediendo algo de su energía. La presión caía sólo alrededor de un 10 por ciento a través de cada par de palas fija y móvil; así, la máxima velocidad del vapor era de alrededor de un quinto de la que poseía una turbina de una sola etapa. Parsons razonó que, en caídas de presión tan pequeñas, no habría graves errores si pensáramos que el vapor constituía, como el agua, un fluido incompresible. Así pudo estimar las velocidades del vapor, rendimientos ideales y formas de pala adecuadas con muy buena aproximación. El sistema de Parsons de dejar que el vapor se expandiera en muchos pasos graduales, punto fundamental de las turbinas actuales, fue sólo una de las muchas innovaciones que introdujo en su máquina de 1884.

Otra innovación fue un nuevo tipo de conjinete, específicamente diseñado para ejes que girasen a altas velocidades. A pesar del éxito de Parsons en la reducción de la velocidad de su turbina, todavía necesitaba que los ejes girasen por lo menos 10 veces más deprisa que cualquier máquina o motor existente. Esto le obligó a enfrentarse con el fenómeno del "torbellino" del eje ("*whirlling*"). Los ingenieros de la época sabían que cada eje tenía una velocidad crítica característica, a la que cualquier ligero desequilibrio podía hacerlo saltar violentamente. Se había hallado que la velocidad de rotación crítica correspondía a la frecuencia natural de vibración lateral del eje (la frecuencia a la que el eje resuena si se le golpea). Parsons y De Laval encontraron, cada uno por su cuenta, que un eje giraría suavemente si se lo aceleraba por encima de la velocidad crítica. Sin embargo, el eje deflectaba todavía ligeramente por culpa de pequeños desequilibrios. Para prevenir, pues, daños en el eje, era necesario que girase en cojinetes que permitieran algún movimiento lateral.

Parsons intentó primero apoyarlo en un cojinete ordinario sobre soportes de muelle, pero el arreglo empeoraba la vibración. Ideó entonces un cojinete soportado por un conjunto de arandelas. Las había de dos tipos: se alternaban arandelas que se ajustaban al revestimiento interior del cojinete (en el que giraba el eje) sin tocar su cubierta con otras que se ajustaban a la cubierta aunque se separaban del revestimiento interior. Todo el conjunto estaba comprimido por un muelle. Cabía, pues, un pequeño movimiento lateral del eje, si bien las vibraciones tendían a ser amortiguadas por la gran cantidad de fricción entre los dos tipos de arandelas.

El conjunto funcionó muy bien. Los



3. ESTA SECCION de la turbina de Parsons ilustra el flujo de vapor, aire y aceite en el prototipo de 1884 [*véase la figura 1*]. El vapor a alta presión (*rojo oscuro*) entra por el centro del eje fluyendo hacia cada extremo a través de las palas de la turbina de vapor. El vapor de escape (*rojo claro*) fluye hacia dos cavidades unidas por un conducto situado en el fondo de la carcasa. Más allá se encuen-

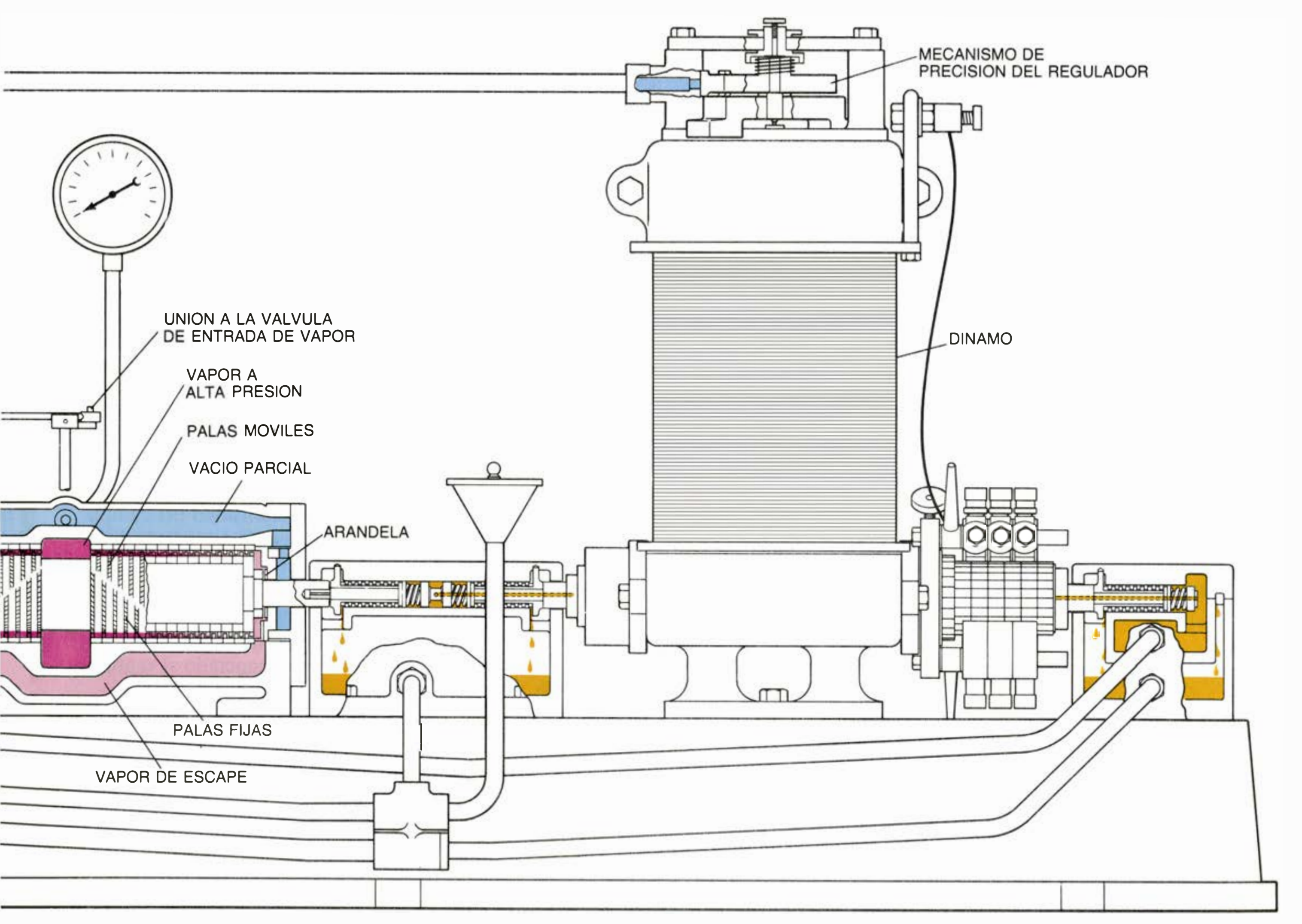
que vieron el prototipo de turbina operar en la Feria de Muestras de Londres dedicada a la Invención en 1885, señalaron cuan suavemente giraba en comparación con las máquinas de vapor contemporáneas. Estas eran fuente inevitable de gran cantidad de vibración que se transmitía a grandes distancias a través de sus bases.

El prototipo de Parsons se alimentaba de vapor por el centro del eje a través de una válvula de regulación. Allí, el vapor se dividía: una mitad fluía hacia un extremo del eje y la otra mitad hacia el otro. Cada una de las corrientes atravesaba un grupo de ruedas de turbina.

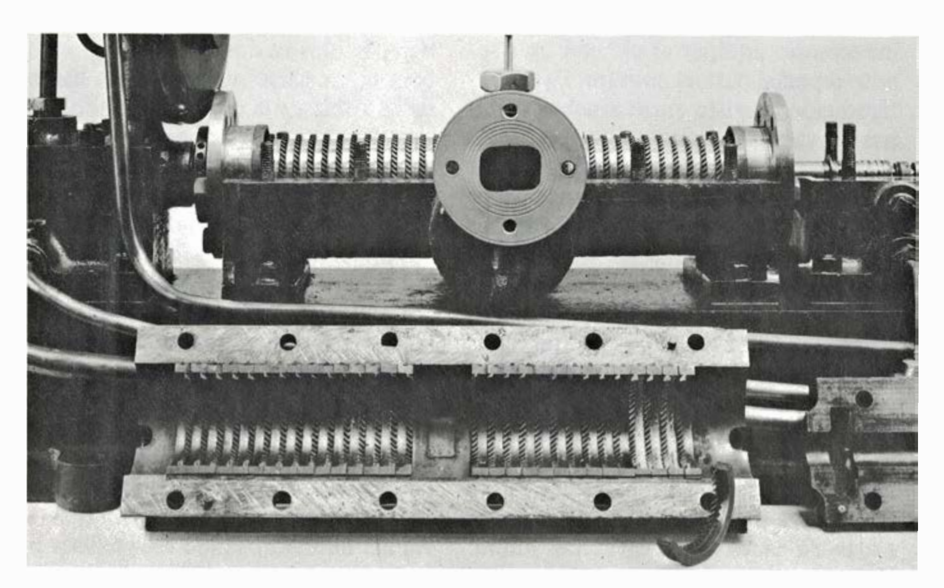
Gracias a la división del flujo cualquier fuerza axial producida por el vapor al chocar contra las palas quedaba exactamente contrarrestada y hacía innecesario equipar al eje con un cojinete especial para el empuje. Esta configuración persiste entre muchas turbinas de vapor actuales.

A pesar de la innovación de permitir que el vapor se expandiera en muchas etapas, el primer prototipo de Parsons giraba a una velocidad elevada: 18.000 revoluciones por minuto. Ello significaba que la fuerza centrífuga sobre las palas del rotor venía a resultar unas 13.000 veces la de la gravedad. Para evitar que las ruedas salieran despedidas, utilizó un diseño sencillo: cada rueda estaba hecha de un solo anillo de latón y los pasos entre palas consistían en ranuras inclinadas 45 grados, realizadas en la circunferencia del anillo. Los anillos móviles se encontraban embebidos en el eje de acero y apretados contra un saliente central por abrazaderas atornilladas. Los anillos fijos estaban partidos en dos mitades, una embebida en la parte superior de la carcasa de la turbina y la otra en el fondo. Para permitir el aumento de volumen del vapor al expandirse, las palas aumentaban de longitud en tres etapas, desde 0,508 hasta 0,711 centímetros. Los bordes de ataque de las palas estaban biselados para mejorar el flujo del vapor.

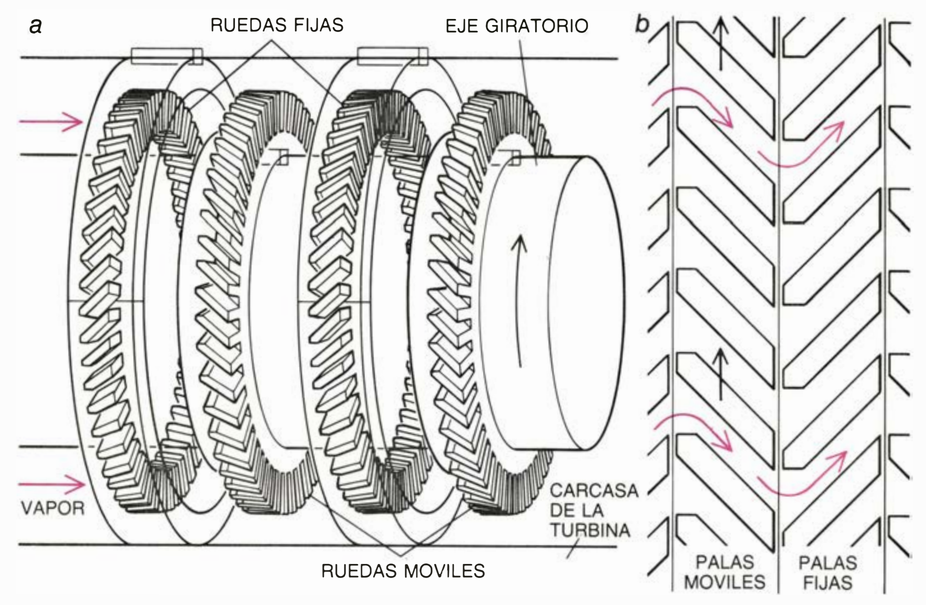
La elevada velocidad de rotación de la turbina presentaba otras complicaciones. Ninguno de los medios para reducir la velocidad (como los trenes de engranajes) accesibles en esa época era adecuado para tales velocidades. No se podían usar los sencillos reguladores de bola utilizados en las máquinas de vapor: hubieran salido despedidos por la fuerza centrífuga. En su lugar, Parsons desarrolló un dispositivo de regulación enteramente nuevo. Se conectaba un ventilador centrífugo, montado



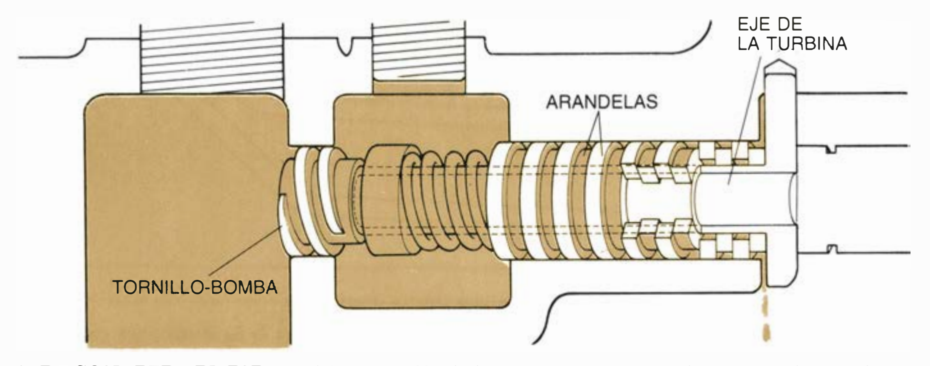
tran otras dos cavidades unidas en la mitad superior de la carcasa, donde hay un vacío parcial (*azul*). Unas arandelas, adheridas al interior de la carcasa por succión entre la cámara de escape y la de vacío parcial, impiden la salida del vapor de escape a lo largo del eje de rotación. La lubricación se realiza por medio de un tornillo (*a la izquierda de la figura*) que obliga al aceite (*amarillo*), sometido a presión, a pasar al cojinete del eje. A través de conductos, el aceite fluye hasta otros cojinetes, alcanzando el central por el eje de la dinamo, que está ahuecado (*en el centro y a la derecha de la ilustración*). El regulador está controlado por un ventilador centrífugo (*a la izquierda*), que crea un vacío parcial (*azul*) en un sistema de tubos. El vacío produce succión al actuar sobre un diafragma de piel que, a su vez, se halla unido a la válvula que controla la cantidad de vapor que entra en la turbina. El regulador se afina mediante un mecanismo situado en la parte superior de la dinamo. Este mecanismo controla el flujo de aire en el sistema sellado de tubos según el voltaje de la dinamo. La succión en estos tubos eleva también el aceite que sobra de los cojinetes hasta un depósito en columna (*en el extremo izquierdo de la figura*).



4. RUEDAS DE PALAS: se fabricaron en anillos sólidos de latón cortados con ranuras a 45 grados. Las ruedas móviles estaban embebidas en el eje de la turbina, mientras las fijas estaban partidas por la mitad y unidas a las dos mitades de la carcasa de la turbina (*en la fotografía se ha desmontado la mitad superior*).



5. SECUENCIA ALTERNADA de palas fijas y móviles (*a*); canalizaba el flujo de vapor, que se expandía y aceleraba al pasar entre las palas fijas. Estas dirigían el flujo acelerado hacia las palas móviles. El vapor se expandía en éstas, impulsándolas. El detalle (*b*) muestra uno de los 15 pares de palas fija y móvil.



6. EL COJINETE DEL EJE permitía algo de movimiento lateral, pero amortiguaba también las vibraciones. Un muelle comprimía una secuencia de arandelas en que se alternaban las que se ajustaban al revestimiento interior del cojinete (donde giraba el eje), sin tocar su cubierta, con las que se ajustaban a la cubierta separándose del eje. El eje necesitaba alguna libertad de movimiento para que los pequeños desequilibrios que se producían no lo dañaran; la fricción entre las arandelas amortiguaba la vibración. Un tornillo (*a la izquierda*) hacía pasar el aceite (*amarillo*) al cojinete desde un depósito en columna.

sobre el eje de la turbina, a un conjunto sellado de tubos llenos de aire. Al girar el ventilador, extraía aire del sistema de tubos, creando un efecto de succión. Este efecto actuaba sobre un diafragma de piel situado en un extremo del sistema. A su vez, el diafragma se unía por medio de un eje a una válvula de regulación que controlaba el flujo de vapor hacia la turbina. Cuando la turbina aceleraba, el ventilador creaba mayor succión en el diafragma; entonces, la válvula unida al diafragma reducía la cantidad de vapor que entraba en la turbina, disminuyendo así su velocidad de rotación.

Este regulador funcionaba bien, aunque no era muy preciso. La turbina prototipo de Parsons impulsaba una dinamo (un generador eléctrico). En la época en que Parsons diseñó su primera turbina, las lámparas incandescentes costaban aproximadamente lo que un cuarto de tonelada de carbón: si no se hubiese fundido por los saltos de potencia (lo que sucedía frecuentemente si se usaban máquinas de vapor), el voltaje generado por la dinamo podría no haber variado más de un uno o un dos por ciento. Así pues, Parsons dotó a su regulador de un mecanismo de precisión que dependía directamente del voltaje de la dinamo.

El voltaje entre los terminales de una dinamo es proporcional al campo magnético que rodea sus polos. Parsons colocó un asa de hierro dulce, conectada a un muelle ajustable, en la parte superior de la dinamo. El asa de hierro tendía a alinearse con el campo magnético venciendo la resistencia del muelle; el grado de alineamiento dependía directamente de la intensidad del campo que, a su vez, dependía del voltaje de la dinamo. Al moverse, el asa arrastraba consigo una manecilla de latón que cerraba progresivamente más o menos el extremo de un tubo que formaba parte del sistema de aire conectado al ventilador centrífugo.

Al aumentar la intensidad del campo magnético, la manecilla cerraba progresivamente el extremo del tubo. Esto impedía que el aire escapara del sistema, aumentando el efecto de succión creado por el ventilador centrífugo. Entonces, el diafragma de piel, que estaba conectado a la válvula reguladora, se aspiraba, cerrando la válvula de entrada de vapor y restringiendo la llegada de vapor a la turbina. Así, la velocidad de la turbina estaba regulada directamente por el voltaje de salida de la dinamo. El mecanismo de precisión de Parsons fue uno de los primeros servo-

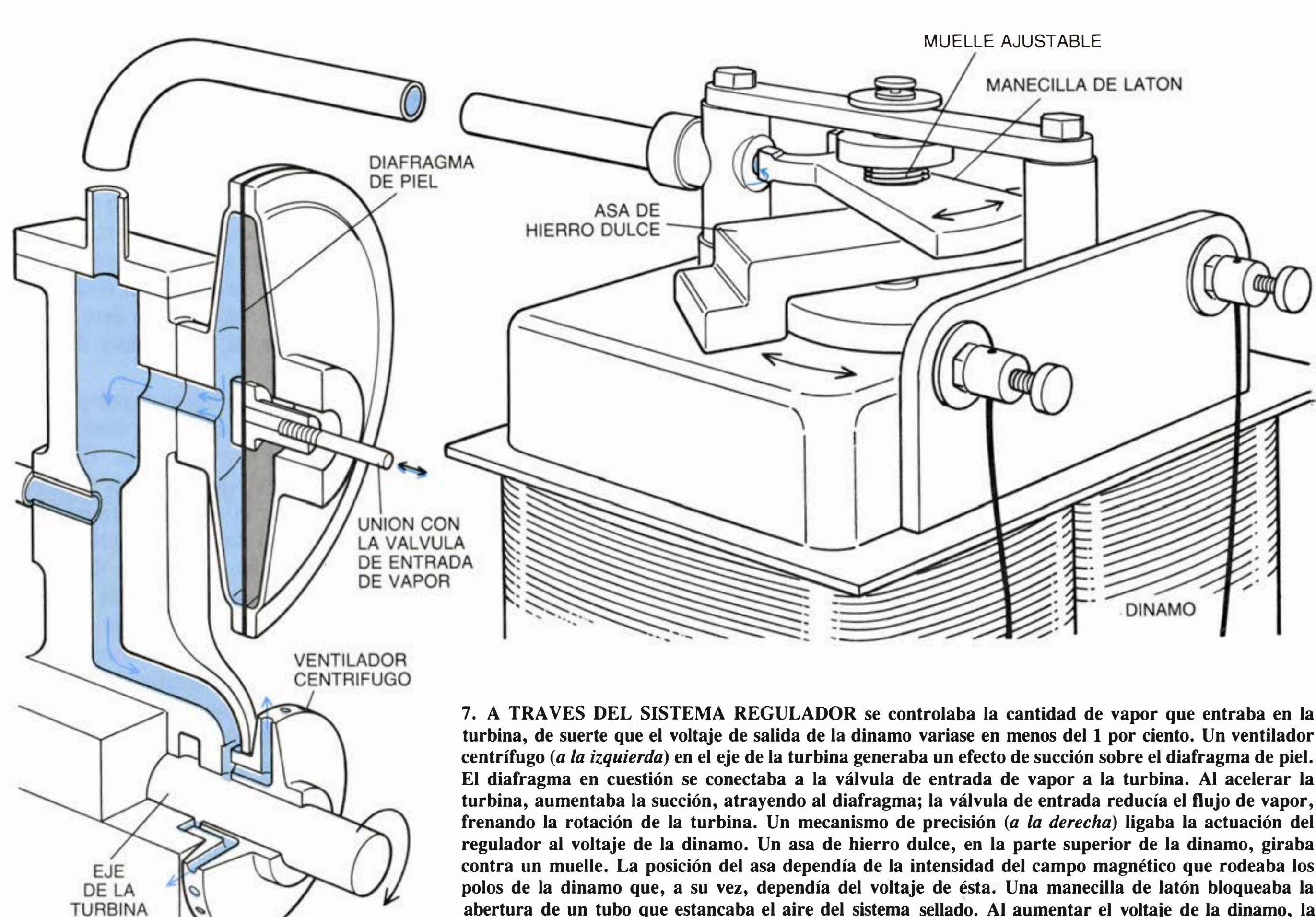
motores, un tipo de dispositivo de realimentación que sólo requiere pequeñas cantidades de potencia para regular el flujo de cantidades mucho mayores.

El ventilador centrífugo, que era parte importante en el regulador de Parsons, también desempeñaba un papel en su sistema de lubricación. Debía ser ésta absolutamente segura, pues el eje de la turbina giraba a elevadas velocidades. Parsons sujetó un tornillo al extremo del eje y lo colocó en la abertura de un depósito de aceite. El tornillo obligaba al aceite a presión a pasar al cojinete del eje. El aceite también llegaba al extremo alejado del eje de la dinamo a través de un sistema de conductos. El eje de la dinamo estaba ahuecado para que el aceite pudiera fluir por él hasta los cojinetes centrales, enfriando de paso la armadura de la dinamo. El aceite volvía a una estación central por la acción de la gravedad. El depósito principal de aceite quedaba conectado, mediante un tubo vertical, al sistema de tubos de aire unido al ventilador centrífugo. La succión generada por el ventilador servía para elevar el aceite desde la estación central hasta el depósito principal, que así alcanzaba un nivel suficiente para alimentar el tornillo.

Otra innovación de la turbina de Parsons, que todavía se usa en las actuales, fue su método para asegurar que el vapor no saliera por los extremos del eje de la turbina hacia la máquina. Cualquier intento de que la cubierta se ajustara perfectamente al eje hubiera producido una grave fricción al pasar éste por la velocidad de "torbellino". Así pues, diseñó una abrazadera muy ajustada que permitiera moverse al eje relativamente libre hasta que alcanzara la velocidad estacionaria de funcionamiento. Cuando la turbina llegaba a esa velocidad, la abrazadera actuaba de sello, manteniendo con eficacia el vapor de escape en la turbina.

Una vez conseguida la velocidad de funcionamiento, la abrazadera permanecía en su sitio gracias al efecto de succión que se establecía entre el canal de escape y una cámara con un vacío parcial. El vapor de escape pasaba por dos cavidades (una en cada extremo del eje), a través de un orificio de salida practicado en la sección inferior de la carcasa de la turbina. Más allá de cada una de las cavidades había otra cavidad. Un paso abierto en la sección superior de la carcasa conectaba estas actividades exteriores entre sí. Parsons colocó una abrazadera ajustada al eje dentro de cada una de las cavidades interiores. Utilizó también una bomba extractora de vapor para generar un vacío parcial en las cavidades exteriores. Cuando la turbina giraba a baja velocidad, la abrazadera podía moverse libremente con el eje. Sin embargo, al aproximarse a la velocidad de funcionamiento, se creaba una diferencia de presión entre las cavidades interiores (que recibían vapor de escape a baja presión de la turbina) y las exteriores (en las que había un vacío parcial). La diferencia de presiones entre las cavidades mantenía la abrazadera ajustada a la carcasa del motor y aislaba unas cavidades de otras.

¿Qué tipo de educación y de enseñanzas formaron el talento de Parsons, capacitándole para resolver los problemas que habían frustrado el desarrollo de la turbina? Algunas influencias están claras. Parsons era el hijo menor de una familia que a principios del siglo XVII obtuvo tierras en Birr, condado de Offaly, en Irlanda. El propio padre de Charles, tercer conde de Rosse, fue un científico competente. Realizó contribuciones notables a las técnicas de vaciado y esmerilado de espejos para telescopios, y en 1845 cons-



7. A TRAVES DEL SISTEMA REGULADOR se controlaba la cantidad de vapor que entraba en la turbina, de suerte que el voltaje de salida de la dinamo variase en menos del 1 por ciento. Un ventilador centrífugo (*a la izquierda*) en el eje de la turbina generaba un efecto de succión sobre el diafragma de piel. El diafragma en cuestión se conectaba a la válvula de entrada de vapor a la turbina. Al acelerar la turbina, aumentaba la succión, atrayendo al diafragma; la válvula de entrada reducía el flujo de vapor, frenando la rotación de la turbina. Un mecanismo de precisión (*a la derecha*) ligaba la actuación del regulador al voltaje de la dinamo. Un asa de hierro dulce, en la parte superior de la dinamo, giraba contra un muelle. La posición del asa dependía de la intensidad del campo magnético que rodeaba los polos de la dinamo que, a su vez, dependía del voltaje de ésta. Una manecilla de latón bloqueaba la abertura de un tubo que estancaba el aire del sistema sellado. Al aumentar el voltaje de la dinamo, la manecilla cerraba más la abertura, la succión del diafragma aumentaba y entraba menos vapor.

truyó en sus talleres un telescopio reflector que sería el mayor del mundo durante varias décadas. Descubrió nebulosas espirales y presidió la Royal Society de Londres desde 1849 hasta 1854. Llegó al Parlamento y para atender sus deberes en la Cámara mantuvo una casa en Londres. La familia solía vivir allí parte del año, recibiendo a menudo a miembros de la comunidad científica.

Los hijos de los Parsons no fueron a la escuela. Suponíase que los astrónomos empleados para trabajar de noche en los telescopios también darían clases a los niños durante el día. Además, los chicos fueron animados a aprovechar las fundiciones y talleres de su propiedad. La habilidad manual práctica que Charles adquirió así iba a ser de crucial importancia al construir su prototipo de turbina.

Charles se matriculó en el Trinity College de Dublin, y más tarde se trasladó al St. John's College, en la Universidad de Cambridge, por la que se graduó en 1877. Allí estudió matemáticas con Edward J. Routh, quien en esa época escribía sobre la estabilidad del movimiento estacionario y estaba especialmente dedicado al funcionamiento de reguladores de motor.

Hasta ese momento, Parsons había disfrutado de una formación excepcionalmente privilegiada. Se completó de un modo sorprendente, dada su situación social: se colocó de aprendiz con George Armstrong, conocido constructor de artillería naval, en su fábrica de Elswick, en Newcastle upon Tyne. Sería interesante conocer lo que condujo a esta decisión de Parsons, pues por aquellos días los hijos de los ricos rara vez consideraban la ingeniería como carrera.

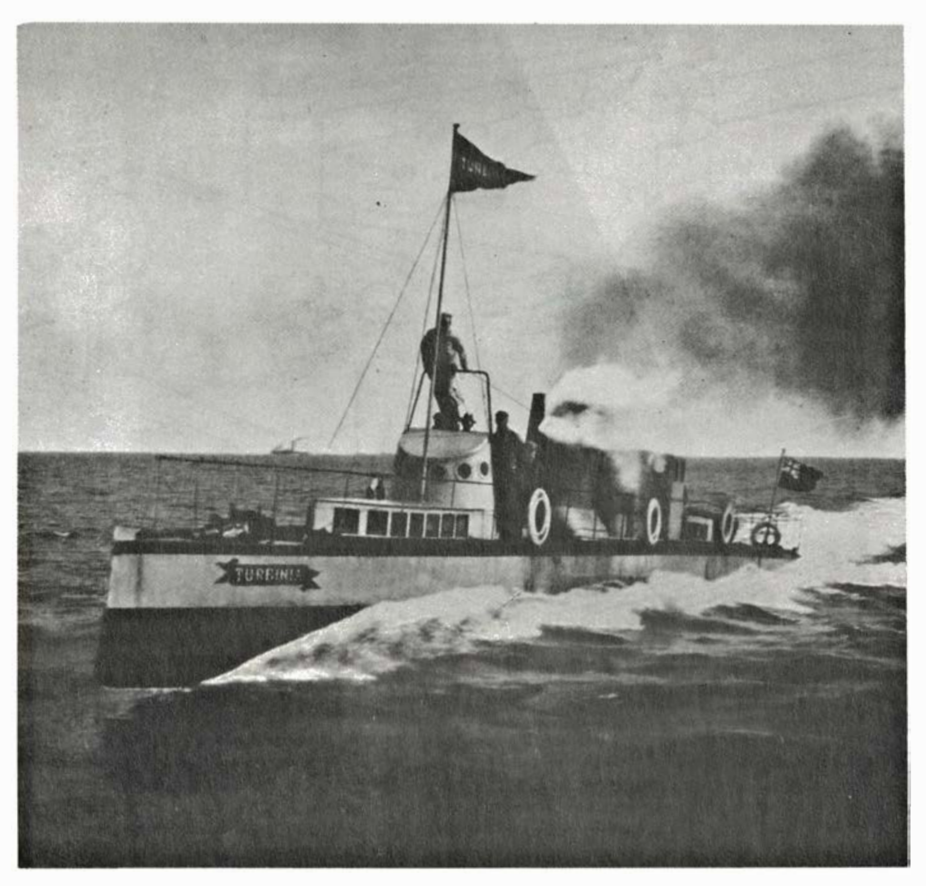
Parsons ganó fama de ser el aprendiz más aplicado de Armstrong. Durante su aprendizaje consiguió permiso para trabajar en un motor de vapor revolucionario en el cual los cilindros giraban, obteniendo varias patentes entre 1877 y 1882. El examen de estas patentes revela que utilizó la técnica de lubricación forzada más de una década antes que A. C. Pain, al que generalmente se considera su inventor. Hasta entonces los cojinetes se alimentaban por goteo, requiriendo una atención constante. El desarrollo de la lubricación forzada revistió el máximo interés para la maquinaria de altas velocidades. Iba a resultar esencial para las turbinas.

Parece probable que los pensamientos de Parsons ya se dirigiesen hacia las turbinas desde su época estudiantil. Lord Rayleigh cita a un contemporáneo de Cambridge al que había mostrado en sus habitantes una máquina de papel de juguete, cuyas ruedas "simplemente giraban" cuando Parsons la soplaba. Parsons decía de ella que "giraría veinte veces más deprisa que cualquier máquina".

Su verdadera experimentación con turbinas empezó mientras estaba con Armstrong. Del año 1881 al 1883, recién terminado su aprendizaje, Parsons trabajó en sociedad con James Kilson, de Leeds, sobre torpedos impulsados por gas. Muchos de los negocios de Armstrong estaban relacionados con el armamento naval, y es posible que el patrón de Parsons hubiera alentado los experimentos sobre una nueva forma de propulsión de torpedos. En estos torpedos se quemaba carburante para producir chorros de gas a alta presión. Los chorros chocaban contra las palas de un rotor poniéndolo en movimiento. A su vez, el rotor impulsaba la hélice del torpedo.

En los cuadernos de Parsons no hay indicaciones claras sobre la configuración de los rotores, pero podemos hacernos una idea de cómo estaban construidos gracias a un pequeño bote de chapas de cobre que construyó por esa época. El bote estaba impulsado por una hélice de tres palas situada bajo el casco. La hélice iba montada en el interior de un gran anillo cuya circunferencia estaba cortada formando pasos para los chorros de gas. El anillo exterior contenía 44 pasos, todos cortados en espiral. Al forzar el gas a través de los pasos, la fuerza de deflexión resultante hacía girar el anillo. Al girar éste, la hélice giraba con él, moviendo el bote hacia adelante.

Así pues, los primeros experimentos de Parsons sobre turbinas concernieron a las de gas, no a las de vapor. En 1883 abandonó el trabajo sobre las turbinas de gas, aunque la especificación de su patente de 1884 describe el actual ciclo de turbina de gas. Años más tarde explicaría que "los experimentos realizados hace muchos años, algunos de los cuales estaban orientados a averiguar la posibilidad de una turbina de gas, me convencieron de que con los metales a nuestra disposición (...) el quemar combustible para que chocara contra las palas era un método equivocado, ya fuera a pleno calor o enfriando con una mezcla de vapor o agua". Su juicio era acertado: los materiales adecuados para componentes de las turbinas de gas no fueron disponibles hasta una dé-



8. EL *TURBINIA* fue el primer barco impulsado por turbina. Terminado en 1894, el *Turbinia* alcanzó una velocidad récord de 34 nudos. La propulsión por turbinas se generalizó para impulsar grandes naves.

cada poco más o menos después de su muerte.

A principios de 1884, Parsons se unió a Clarke Chapman y Cía. como nuevo socio en Gateshead, donde se puso a trabajar en el diseño de una turbina de vapor. Sus cuadernos sobre los experimentos con torpedos muestran que en agosto de 1883 todavía no había comprendido la importancia de igualar la velocidad de las palas de la turbina a la de los chorros de gas. Ni comprendía tampoco los problemas de diseño de una tobera con grandes relaciones de presión. Sin embargo, en abril de 1884 presentó dos patentes provisionales, y en octubre y noviembre del mismo año las especificaciones finales detalladas.

Fue un período de increíble creatividad. Parsons no solamente tuvo que experimentar con ejes de alta velocidad y otras caracterísiscas de la turbina, sino también idear los medios adecuados para utilizar la salida de su motor. Girando a 18.000 r.p.m., no era apropiado para tareas convencionales. Eligió el desarrollo de una dinamo que pudiera acoplarse directamente a la turbina, capaz de velocidades que pocas máquinas eléctricas actuales igualan. Parsons diría a menudo años más tarde que este logro fue tan importante como la construcción de la propia turbina. Incluso hoy en día, la principal aplicación de las turbinas de vapor consiste en mover generadores eléctricos directamente acoplados.

Las primeras máquinas no fueron eficientes. Mientras la salida de estos "comedores de vapor" no creciera hasta igualar la economía de las máquinas de vapor convencionales, necesitarían características especiales para atraer clientes. Estas fueron proporcionadas por su pequeño tamaño, la estabilidad de su salida eléctrica, su capacidad para funcionar sin atención y su bajo coste de mantenimiento. Todas ellas estaban presentes en la primera máquina.

En noviembre de 1884, cuando terminó su prototipo, el honorable Charles A. Parsons sólo tenía 30 años. Su genio de ingeniero y un instinto para las necesidades del mercado no fueron por sí mismos dones suficientes para asegurar que su invento alcanzara la madurez rápidamente. En varias ocasiones tuvo que recurrir al dinero de su patrimonio para consolidar su trabajo. En 1898, durante el proceso judicial para extender la vida de sus patentes, se calculó que hasta ese momento el desarrollo de la turbina le había costado la suma de 1107 libras, 13 chelines y 10 peniques.

Juegos de ordenador

Cinco piezas sencillas para bucle y generador de números aleatorios

A. K. Dewdney

¿Cómo valernos de un cañón para medir qué superficie ocupa una charca en un campo? Disparemos muchísimas veces con el cañón sobre el campo, en muchísimas direcciones, de modo tal que los tiros se distribuyan uniformemente, al azar, por todo él. La superficie de la charca será, aproximadamente, igual a la superficie del campo, multiplicada por el número de impactos en el agua, y dividida por el total de balas disparadas. Este problema, que reconozco es absurdo, ilustra perfectamente el papel que pueden desempeñar los sucesos aleatorios en la simulación de procesos. Los ordenadores modernos son instrumentos particularmente útiles para efectuar simulaciones. En los ordenadores, el azar no se origina con tiros de cañón, sino mediante un generador de números aleatorios.

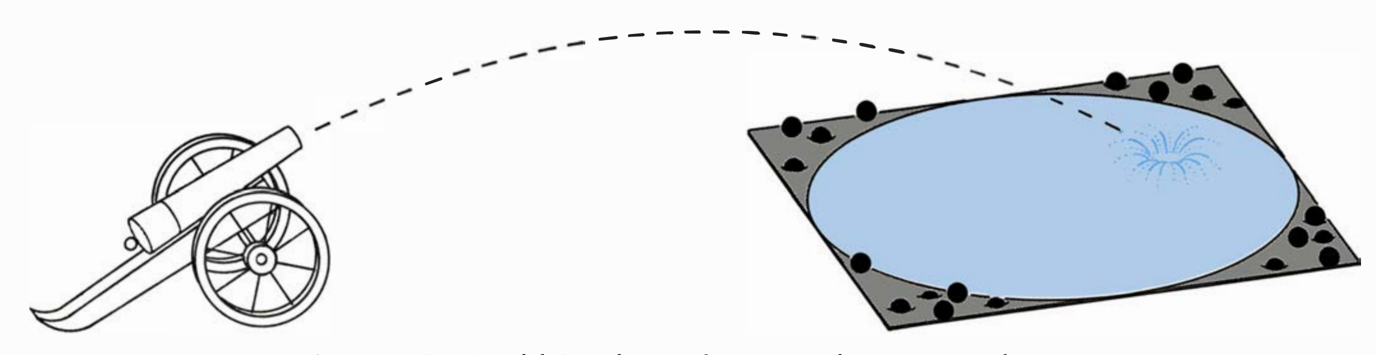
Desde un enfoque filosófico, es curioso que los números aleatorios, que son la más pura expresión de nuestra ignorancia, puedan subyacer a nuestra capacidad para adquirir nuevos conocimientos acerca de los sistemas complejos. Ilustraré este tema en una serie de programas que llamo cinco piezas fáciles: utilizaremos números aleatorios para calcular el valor aproximado de π; para simular los instantes de llegada de las personas a un banco; para investigar una distribución de canicas; para generar pautas de voto y para mostrar cómo puede hacerse esperar a millones de personas en una cola.

Ofrezco las cinco piezas animado de un cierto espíritu musical. Aprender a tocar el ordenador se parece mucho a aprender a tocar un instrumento, y puede disfrutarse de ello a todos los niveles de formación y destreza. Consecuentemente, la primera pieza será la más sencilla; seguramente la última no sea difícil. En todo cuanto sigue supondré que la instrucción *azar* (en muchos lenguajes de programación se usa la palabra inglesa *random*) nos proporciona números sacados al azar. Tales números han de ser decimales comprendidos entre 0 y 1, con longitud de varios dígitos.

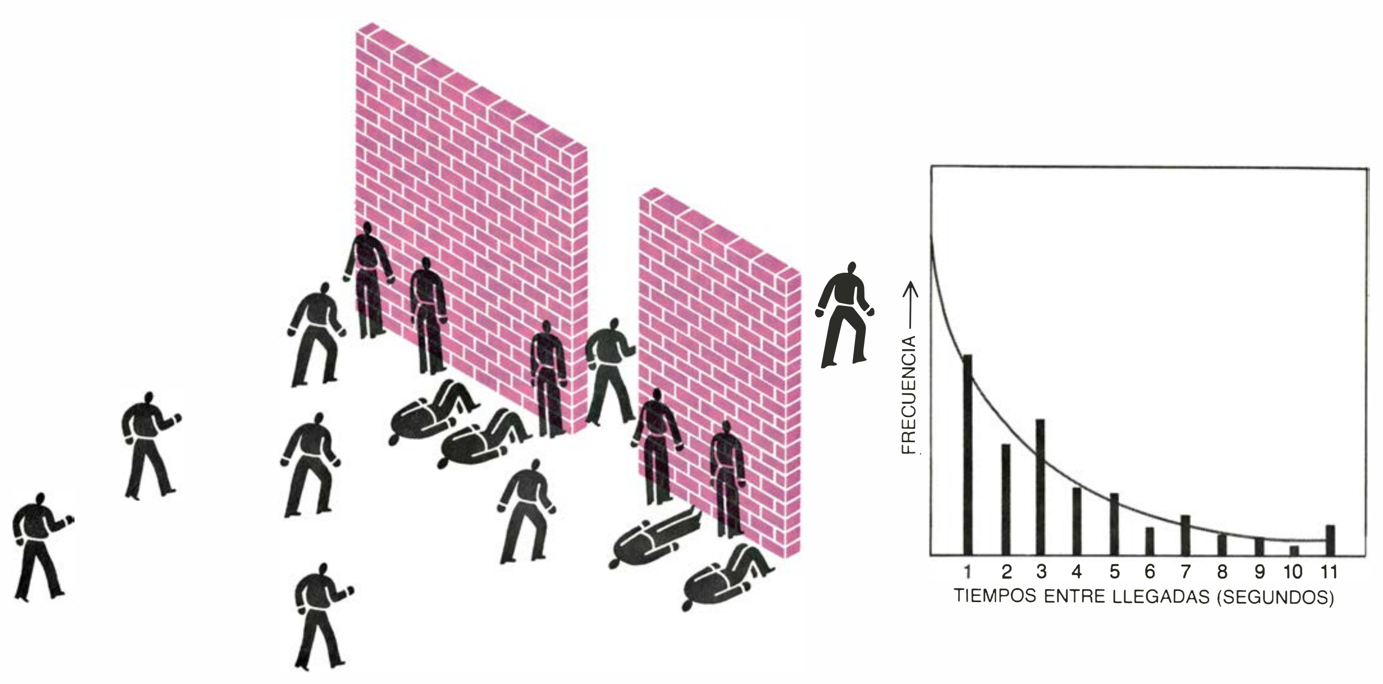
La primera pieza guarda relación con un problema llamado "aguja de Buffon", en recuerdo del conde Louis de Buffon, naturalista y matemático francés del siglo pasado. Imaginemos que una aguja se lance un grandísimo número de veces a un suelo de tablas machihembradas. Supongamos que la longitud de la aguja sea la mitad de la anchura de las tablas. El problema consiste en hallar la probabilidad de que la aguja quede, al caer, atravesada sobre una grieta del piso. La solución resulta ser $1/\pi$.

Cabe en lo posible, desde luego, redactar un programa que simule los lanzamientos de la aguja de Buffon, pero hay un modo mucho más sencillo de calcular una aproximación del valor de π mediante simulación. La técnica a emplear se inspira en la idea de disparar al azar cañonazos sobre un campo. Imaginemos un campo cuadrado que circunscribe a una charca circular, que es tangente a los cuatro lados del cuadrado. Disparando con el cañón muchísimos tiros sobre el cuadrado, la proporción de tiros caídos en la charca será, aproximadamente, igual a la razón entre el área del círculo y el área del cuadrado, que es $\pi/4$.

La simulación puede llevarse a cabo mediante un sencillo programa, llamado PINT. Representemos mediante un cuadrado unidad uno de los cuadrantes del campo, por ejemplo, el cuadrante nordeste. El punto (0,0), que ocupa en el cuadrante el vértice suroeste, yace en el centro de la charca. Y el punto (1,1), vértice nordeste del cuadrante, es uno de los ángulos del campo. Eligiendo ordenadamente, en sucesión, dos números aleatorios x e y podemos simular un tiro aleatorio caído en el cuadrante. (Recordemos que cada número aleatorio es un decimal comprendido entre 0 y 1.) ¿Ha caído este tiro dentro de la charca? Para averiguarlo, calculemos la distancia entre (x, y) y el centro de la charca. Si tal distancia es menor o igual que 1, anotamos "agua", e incrementamos en una unidad una variable que hace el papel de contador. Un bucle en el programa permite repe-



1. Determinación del área de una charca, tirando cañonazos al azar



2. Los zombies y sus frecuencias de paso del muro

tir el experimento. Cuando hayamos terminado toda la tanda de disparos, multipliquemos por cuatro la razón resultante; el valor obtenido debería ser cercano a π.

Si hay suficientes lectores que ensayen el cálculo, haré una tabulación de resultados. Envíenme una pasada de 1000 disparos, y yo calcularé el gran promedio. Tal vez, entre todos, hallemos un valor de π mejor que el que obtenga cada cual por su cuenta.

La pieza siguiente saca partido de una técnica llamada "la puerta de los zombies". Imagínese a sí mismo observando a la gente entrar por la puerta de un banco. Todos tienen buenos motivos para llegar cuando lo hacen, y si nosotros conociéramos tales razones, sin duda podríamos simular exactamente los momentos en que llegan. Tal conocimiento, sin embargo, queda presumiblemente más allá de nuestro alcance. Para atender al mismo fin, muchos programas de simulación se valen de una función matemática especial llamada distribución exponencial negativa. Haría falta una página para explicar tanto esta distribución como un método muy bonito para deducir de ella los instantes de llegada. La puerta de los zombies es mucho más fácil de explicar, y proporciona además resultados de apariencia natural.

La puerta de los zombies es un paso de anchura *a* abierto en un muro por lo demás impenetrable. Miles de zombies se dirigen a paso regular hacia este muro; cada segundo, un zombie llega a un punto tomado al azar en el muro. Los afortunados encuentran el portillo, y pasan a su través. Los desafortunados se estrellan contra el muro. Si el portillo del muro da paso a un banco, los aleatorios instantes de arribada de los zombies se asemejan mucho a las llegadas de los clientes ordinarios. Para ajustar la tasa media de llegadas, podemos graduar adecuadamente la anchura del portillo.

Mi programa de generación de instantes de arribada se llama ZOMBIE. En el programa, la pared es una línea de longitud unidad. Un bucle, el llamado bucle "mientras..." va generando los tiempos que separan entre sí las arribadas: por cada segundo en que no llegue al portillo ningún zombie, el bucle "mientras..." incrementa en una unidad una variable de recuento, y apela a la instrucción *azar* para hacer llegar un nuevo zombie hasta algún punto del muro, aleatoriamente elegido. Resulta cómodo, y no implica restricción, suponer que el paso del muro se abre desde 0, situado en el extremo izquierdo, hasta el punto *a*. Cuando el número aleatorio, o sea, la posición del zombie, caiga en esta banda, el programa abandona el bucle y declara que, efectivamente, se ha colado un zombie por el portillo. En caso contrario, el programa recomienza el bucle. Tarde o temprano, un zombie pasa por el portillo; el valor que entonces contenga el contador dice cuántos segundos han transcurrido desde la última llegada.

El tiempo medio que separa dos llegadas es de $1/a$ segundos. Si, por ejemplo, *a* es 1/10, llegará por término medio un zombie cada 1/(1/10), o sea, cada 10 segundos. El programa ZOMBIE da resultados óptimos cuando *a* es francamente pequeño. Por esta razón, pudiera ser adecuado (dependiendo de la aplicación de que se trate) suponer que los zombies están llegando al muro cada décima de segundo. Para hallar el valor de *a* que proporciona una buena simulación, se iguala el valor deseado como promedio de los tiempos entre arribadas al banco, al cociente $1/10a$, y se despeja *a*. Ya dije antes que el portillo podía extenderse desde 0 hasta *a*, pero algunos generadores de números aleatorios operan deficientemente en este intervalo. En tal caso, elíjase en el muro otro portillo más central, entre 0,5 y 0,5 + *a*, pongamos por caso.

Vale la pena examinar la distribución de los tiempos de arribada generados por ZOMBIE. Al introducir el bucle "mientras" en otro que cuente el número de ocurrencias de cada posible intervalo temporal entre llegadas, se prepara un histograma, o diagrama de barras, que representa gráficamente la situación. Vemos en la figura 2 un histograma típico; sobre él, y por comparación, se ha superpuesto la gráfica de la distribución exponencial negativa. Muchas son las potenciales aplicaciones de la técnica del portillo a los vídeojuegos, pero me limitaré a una única aplicación, que daré al explicar la quinta pieza.

La tercera simulación trata del tablero de Galton. Este artilugio, así llamado en recuerdo de sir Francis Galton, precursor de las técnicas estadísticas en la época victoriana, es una superficie plana e inclinada, tachonada con una formación triangular de clavijas [*véase la figura 3*]. Desde lo alto, justo encima de la primera clavija, se van dejando rodar canicas, que caen, en una trayectoria errática y zigzagueante, a través de la formación triangular de clavijas. Debajo del todo hay unos canales que recogen las canicas. Cuando finalmente ha quedado encauzada la última de las canicas, las columnas de recogida muestran un aspecto característico, no como el perfil de Nueva York contra el cielo, sino algo bastante diferente. Quienes hagan la prueba de llevar a la práctica esta pieza podrán descubrir tal forma por sí mismos.

Careciendo de una verdadera tabla de Galton, un programa, que llamaremos GALTON, podrá servir para simular una, y apenas si consumirá unas pocas líneas en el proceso. La idea del programa, lo mismo que la primera pieza acerca del número π, procede de la sección de Jon L. Bentley, "Programming Pearls", correspondiente al número de enero de 1984 de *Communications of the ACM*.

El descenso de una única canica se simula mediante un bucle que elige una sucesión de números aleatorios. Cada número aleatorio determina si la bolita rodará hacia la derecha o hacia la izquierda cada vez que choque con una clavija. Si tal número es menor o igual que 0,5, la simulación de la bolita rueda hacia la izquierda de la clavija; si el número es mayor que 0,5, la bolita desciende por el lado derecho. ¿De qué clavija? No importa. Lo único que tenemos que hacer es asegurarnos de que se incremente en una unidad una variable de recuento cada vez que la bolita se desplace hacia la derecha. Los lectores pueden cerciorarse por sí mismos de que la columna en que vaya a quedar reposando una bolita dada está únicamente determinada por el número de rebotes hacia la derecha que dé durante el descenso. De un solo golpe, queda suprimida la necesidad de una matriz que simule las clavijas individuales. La moraleja de esta observación debería ser obvia: más vale un *bit* de reflexión que un megabyte de programación.

El bucle que remeda el descenso por la tabla de Galton de cada bolita individual está inmerso en un bucle mayor, que especifica el número de canicas a dejar caer. Cada vez que se completa el bucle interior, la columna en la que caiga la bolita ha de registrarse en una tabla c, que representa las columnas. Por cada bolita caída en la columna n-ésima, habrá de incrementarse en una unidad el número $c(n)$. Cuando se haya completado una pasada de, pongamos por caso, 1000 bolitas, la tabla c puede representarse gráficamente, a mano, mediante un histograma. Como es obvio, la representación puede también hacerse automáticamente, mediante ordenador, si se toma uno la molestia de añadir a GALTON unas cuantas instrucciones más, para la presentación gráfica.

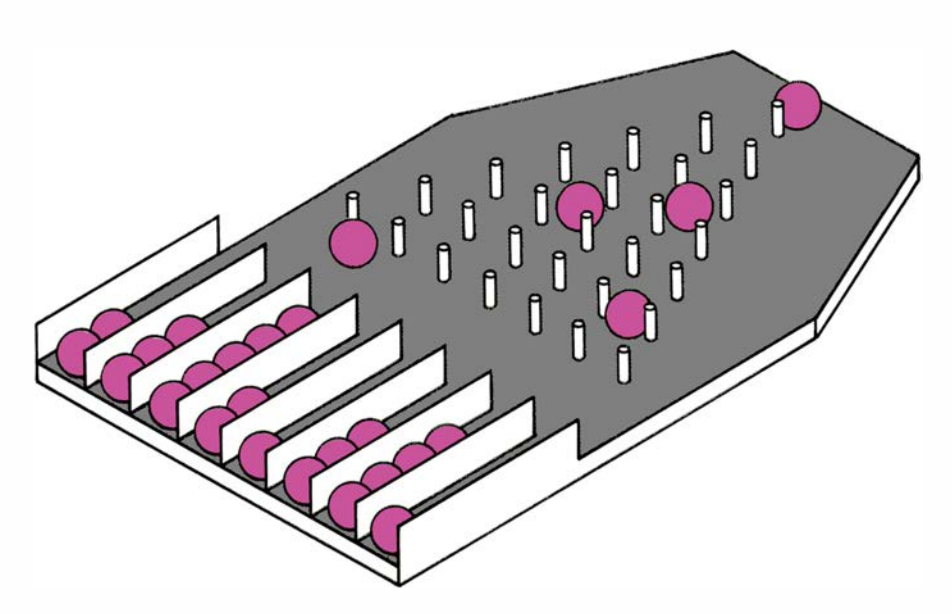
Se me ocurre que disponiendo las clavijas de otros modos podrían generarse mediante la tabla de Galton distribuciones de otras clases. Yo agradecería las noticias de cualesquiera de tales artilugios, tanto si existen ya en realidad como si sólo en mi imaginación.

La cuarta de las piezas fáciles trata de dos nuevos y fascinantes juegos de votación, recientemente estudiados por Peter Donnelly, del University College de Swansea, Gales, y Dominic Welsh, de la Universidad de Oxford. Las casillas de un cuadriculado rectangular están coloreadas de blanco o negro, aleatoriamente. Se supone que cada color refleja la opinión política de una persona residente en esa casilla. A cada señal de reloj, se selecciona al azar uno de los votantes, y su opinión política se somete a cambio: se selecciona al azar uno de sus ocho vecinos, y la convicción política del elector se transforma en la de este vecino, independientemente de cuál fuera su opinión anterior.

El cuadriculado está arrollado sobre sí mismo, de igual manera que lo estaba el océano de Aqua-Tor [véase "Juegos de ordenador"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1985]: el borde superior del cuadriculado se identifica con el borde inferior, y el borde izquierdo, con el derecho. Por consiguiente, un votante que resida en un cuadro situado en uno de los bordes del cuadriculado tiene tres vecinos en el borde opuesto. Tras cada cambio aleatorio en las preferencias de los votantes se efectúa una elección, pero este elemento no tiene por qué formar parte de la simulación, a menos que uno desee supervisar muy de cerca los resultados.

Al hacer funcionar este modelo, confesadamente simplista, del proceso político, ocurren cosas llamativas y extrañas. Primero, se desarrollan grandes bloques de voto homogéneo. Estos bloques son zonas geográficas donde todo el mundo es de la misma opinión política. Seguidamente, tales bloques van migrando en torno al cuadriculado y, durante cierto tiempo, luchan, como buscando su predominancia. Finalmente, el sistema bipartidista se viene abajo, por acabar todo el mundo votando de igual manera. El bloque más pequeño se esfuma, al tiempo que la democracia, por votación, decide dejar de existir –¿o no? He aquí una preciosa preguntita filosófica.

Un breve programa, llamado VOTANTES, puede recoger todos los elementos esenciales de este modelo. En VOTANTES hay una matriz que tiene las mismas



3. Tabla de Galton. La distribución de canicas de la figura es improbable

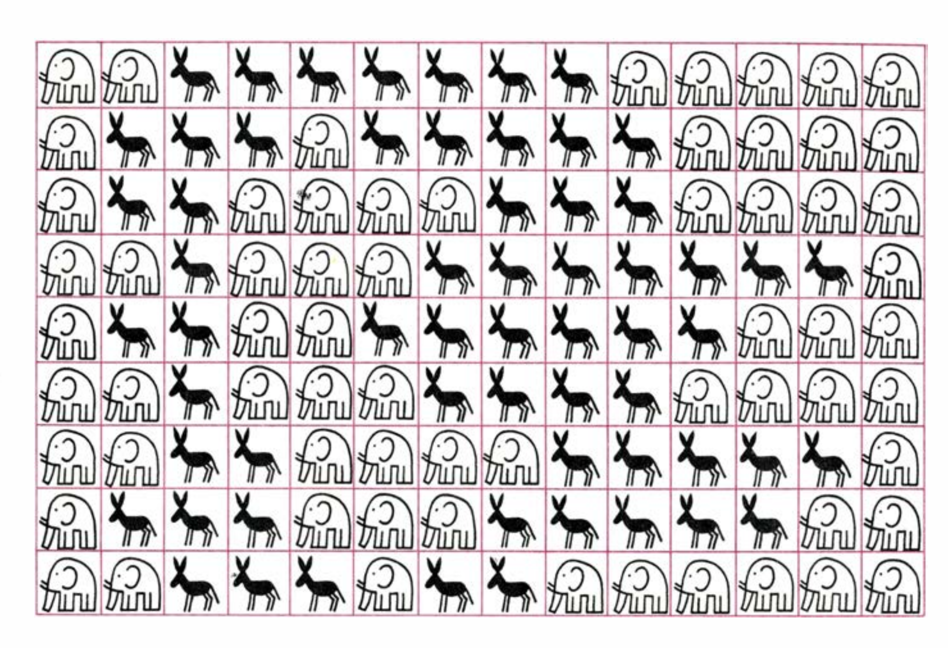
dimensiones que el casillero. Un breve ciclo de cómputo selecciona al azar tres números enteros que, a cada señal de reloj, determinan aleatoriamente un índice de fila, un índice de columna y un código de vecino. Los tres enteros se crean multiplicando el resultado de la instrucción *azar* por una constante y suprimiendo después la parte decimal con ayuda de la instrucción *parte ·entera*. Por ejemplo, si el casillero tuviera 50 filas, la elección de un índice de fila aleatorio podría expresarse algorítmicamente así:

$$i \leftarrow \textit{parte entera}\ (50 * \textit{azar})$$

El índice de columna, también aleatorio, podría computarse de modo análogo. El vecino del cuadrado (i,j) elegido por el programa dependerá de cuál de los enteros de 0 a 7 resulte aleatoriamente elegido. Una vez seleccionados al azar un cuadro y su vecino, el programa VOTANTES remplaza el valor que la matriz contuviera en (i,j) por el del cuadro vecino.

Los pasos precedentes están incluidos en un bucle. Conviene dejar variable el índice límite del bucle, porque los experimentadores pueden querer variar el número de cambios de opinión que puedan sufrir los votantes. El índice límite puede también dejarse variable en los programas que he descrito en este artículo: hágase igual a *n* el límite del bucle externo y facilítese al programa, en su momento, desde el teclado, el valor de *n*.

Es cosa sencilla incorporar al ciclo de cómputo primario de VOTANTES una presentación gráfica del cuadriculado y su estado en cada momento. Utilizando sólo dos caracteres (un asterisco y un punto, pongamos por caso) el efecto es sorprendente y llamativo. Los lectores que no se sientan inmediatamente repelidos por el fenómeno totalitario intrínseco al juego de votación tal vez deseen llevar a la práctica lo que Donnelly y Welsh llaman el juego de antivotación. En este juego, el jugador seleccionado al azar adopta la opinión contraria a la del vecino elegido al azar. ¿Sobrevivirá la democracia gracias a este planteamiento?



4. El juego de votación, en pleno desarrollo (Elefantes, republicanos; asnos, demócratas)

La quinta y última pieza nos da en qué pensar mientras hacemos cola. Si la gente va saliendo por la cabeza de ella, por término medio, con la misma rapidez con que otros van llegando, ¿no se mantendrá la cola más o menos del mismo tamaño? Al parecer, no. De acuerdo con la teoría de colas, tal cola no tiene longitud esperada finita. He podido ver colas así en los bancos.

El programa llamado EN-COLA crea una simulación de una cola sencilla. La gente llega al final de ella, de acuerdo con la pauta generada por el programa ZOMBIE anteriormente descrito. En la cabeza de la cola se encuentra una persona que está siendo atendida, o tratando de serlo. Los programas de simulación incluyen a veces la presunción de que los tiempos de atención tienen la misma distribución estadística que los tiempos de llegada aleatoria de los zombies. El tiempo de atención es breve cuando voy a hacer un depósito, pero es largo cuando discuto con el cajero la desaparición de dinero de mi cuenta corriente. Por consiguiente, el programa EN-COLA apela también al programa ZOMBIE para generar los tiempos de atención dedicados a cada cliente.

EN-COLA gestiona el transcurrir del tiempo por el método del acontecimiento crítico. Un reloj simulado, *r*, va continuamente poniéndose a la hora del próximo acontecimiento, tanto si es una llegada como si es una salida de la cola. Se requieren otras tres variables: *ts*, que es el tiempo que falta para concluir el servicio que actualmente se está prestando; *ta*, tiempo que falta hasta la próxima arribada, y *q*, longitud de la cola [*véase la figura 5*].

Inicialmente, *ts* y *ta* reciben el valor 0, y *q* se hace igual a 1. Seguidamente, EN-COLA entra en su bucle principal, y el número de iteraciones del bucle principal se especifica mediante una instrucción dada desde el teclado. En el seno del bucle hay una instrucción de ramificación condicional, encargada de verificar si *ta* es menor que *ts*. De ser así, el tiempo que registra el reloj se incrementa en la magnitud de *ta*, porque el próximo acontecimiento crítico es la llegada de una nueva persona a la cola. De acuerdo con ello, *ts* se rebaja en la misma cantidad de tiempo y, dado que el acontecimiento crítico es una llegada, *q* se incrementa en 1. Como último paso, ZOMBIE entra en acción para generar el instante de la próxima arribada.

En la cabecera del bucle puede suceder que *ta* no sea menor que *ts*. En tal caso, se efectúan las mismas operaciones en otra rama del programa, aunque intercambiándose los papeles de *ta* y *ts*. El próximo acontecimiento crítico es una nueva prestación de servicios y, por tanto, *q* se decrementa en 1. En esta rama, ZOMBIE genera el siguiente valor de *ts*. Al fondo del bucle, ambas ramas confluyen, en una verificación del valor de *q*. Si *q* es igual a 0 se precisa una nueva llegada, y el programa toma la rama que lleva al primer segmento. En caso contrario, toma la rama conducente a la cabecera del bucle, donde vuelven a ser comparados los valores de *ta* y *ts*.

Es obvio que el programa EN-COLA es más largo que los otros, aunque todavía es lo bastante corto para merecer la calificación de fácil. Probablemente sea buena idea dejar que el tiempo medio entre llegadas, y los tiempos medios de

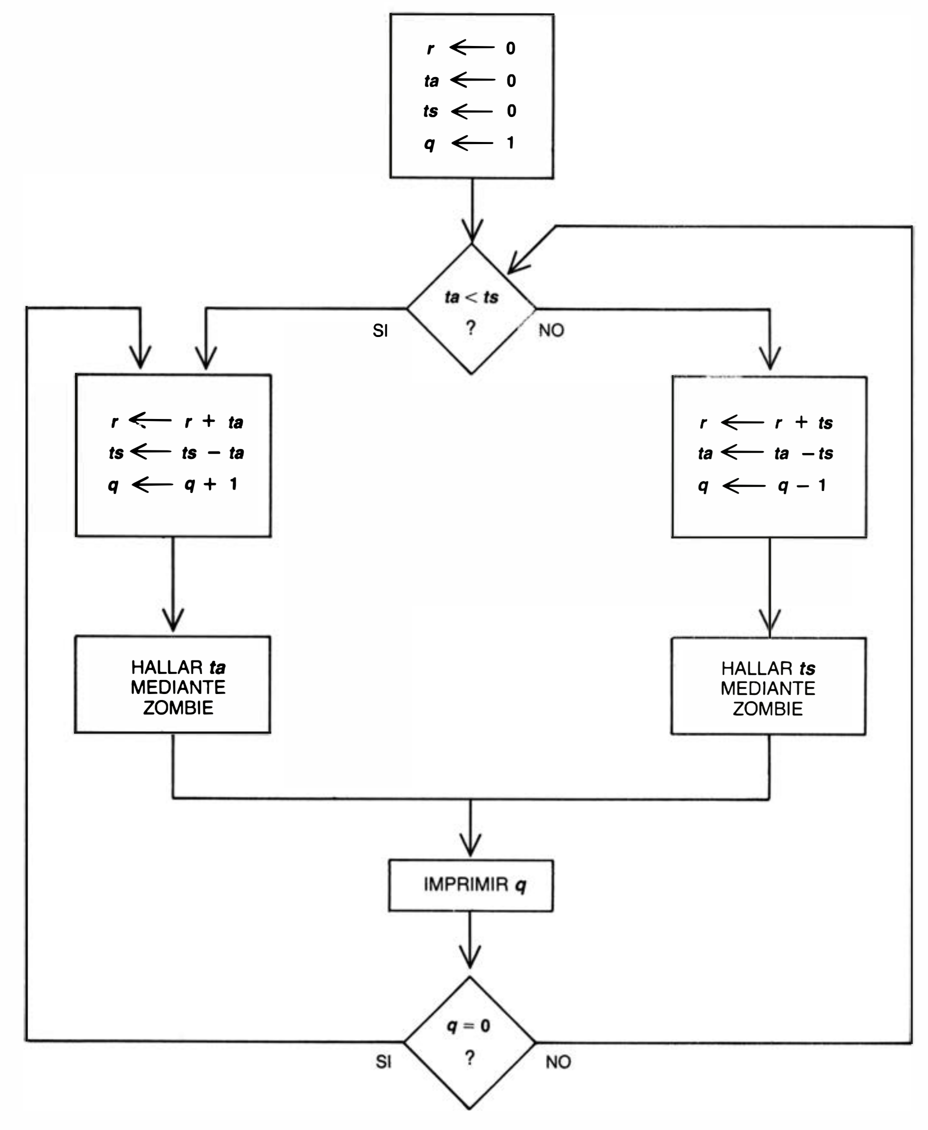
atención a los clientes, los especifique el usuario. De este modo pueden comprobarse los resultados fundamentales de la teoría de colas. Cuando el tiempo medio de prestación de servicio sea menor que el tiempo medio entre llegadas, es de esperar que la cola sea finita; cuanto mayor sea la diferencia entre ambos promedios, tanto más "finita" resultará la longitud. Cuando la relación de los promedios sea la contraria, la longitud esperada de la cola es infinita; observémosla crecer. Cuando los promedios sean exactamente iguales, ¡la longitud esperada de la cola no es ni finita ni infinita! ¿Cómo explicarlo? Unas cuantas horas de observación –o quién sabe si unos pocos minutos de reflexión– seguramente nos darán la respuesta.

Los lectores más aventureros pueden generalizar EN-COLA a fin de que simule los efectos de una innovación puesta en práctica en muchos bancos hace más de diez años: en lugar de esperar en colas individuales, una por cada cajero, los clientes formaban una única cola. El sistema tiene varias ventajas, que pueden comprobarse mediante un programa de simulación que capte los rasgos distintivos de la cola colectiva. Un programa todavía más elaborado podría simular una peculiaridad relativamente nueva de algunos bancos: ahora, incluso los cajeros hacen cola ante su propio supercajero. El nuevo sistema hace imaginar pavorosas posibilidades en bancos realmente grandes.

Todo este parloteo sobre números aleatorios plantea una cuestión definitiva: ¿cómo puede un ordenador, que es una máquina explícitamente determinística, generar números aleatorios, que son implícitamente no-determinísticos? La respuesta es que no puede. Lo que sí puede hacer un ordenador es generar números que *aparenten* ser aleatorios: tomemos un número cualquiera, multipliquémoslo por m, sumémosle k al producto y tomemos finalmente el resto de su división entre p. El número resultante es sometido al mismo proceso. Por repetición, los llamados algoritmos lineal-congruentes van produciendo profusamente números, llamados *pseudoaleatorios*. Empero, más o menos pronto, la serie ha de repetirse, porque solamente hay p posibles restos distintos. Además, a menos que m, k y p estén cuidadosamente elegidos, los números pseudoaleatorios no logran superar ni las más elementales comprobaciones de aleatoriedad.

Teniendo muy presentes tales limitaciones, los especialistas en ciencias de cómputo han tratado de construir una ratonera mejor. Hace muchos años, Donald E. Knuth, de la Universidad de Stanford, ideó un algoritmo tan aleatoriamente tortuoso y tan tortuosamente azaroso, que parecía estar garantizado que engendraría números "superaleatorios", como los llamaba Knuth. El algoritmo de Knuth consta de 12 pasos. Dado un número inicial X, los dos primeros pasos seleccionan en X dos dígitos; estos dos dígitos determinarán cuántas veces habrá de recorrerse el bucle del algoritmo, y hasta cuál de los 10 pasos siguientes habrá de saltar después. Cada uno de esos 10 pasos contiene un método diferente para calcular un nuevo número aleatorio a partir de otro antiguo. Antes de poner a prueba su algoritmo, le parecía a Knuth que "habría de producir al menos un número infinito de números increíblemente aleatorios". Para asombro suyo, "la primera vez que este algoritmo fue puesto a funcionar en un ordenador, convergió casi inmediatamente hacia un número de diez cifras, el 6065038420, que, por una extraordinaria coincidencia, se transforma en sí mismo al aplicarle el algoritmo". La moraleja que Knuth saca es sencilla, ya que no intuitivamente obvia: "Los números aleatorios no deberían engendrarse por métodos elegidos al azar. Se precisa alguna teoría".

Si los métodos numéricos para generar números aleatorios fallan, siempre podemos retornar a una sugerencia que en cierta ocasión realizara Alan M. Turing. Turing propuso basar un generador de números aleatorios en una fuente de radiactividad. A los lectores pueden resultarles gratas las exploraciones en torno a esta idea en "The Computer Scientist: Random Numbers", por Forrest M. Mims III, que apareció en el



5. Diagrama de flujo del programa EN-COLA

número de noviembre de *Computer and Electronics*.

Desde la aparición del artículo de marzo dedicado a RACTER, ha habido más historias acerca del programa lechuga-adicto de las que por sí mismo ha creado. En la actualidad ya he conversado con RACTER con la frecuencia suficiente para darme cuenta de que el programa está, mentalmente, más desequilibrado de lo que al principio pude imaginar.

John D. Owens, de Staten Island, Nueva York, es el distribuidor de RACTER; me escribe diciendo que le ha sido encargado un ejemplar para adiestramiento de los internos de psiquiatría de un hospital, que han de entrevistar a pacientes esquizofrénicos. A otro cliente, RACTER casi le hace perder la chaveta. Describiendo a RACTER como "loco de atar", este señor fracasó en todos sus esfuerzos por detener el programa, mientras RACTER se obcecaba en discutir la proposición de que San Pedro era ateo. Simpatizo de corazón con esta persona. También yo he recorrido la escala que va desde la risa hasta el aburrimiento, e incluso el fastidio y la rabieta. Pero, ¿por qué reaccionar de tal modo con RACTER? No es más que un programa.

Para la familia Owens, RACTER sí es más que un programa. Un cliente preguntó de buen humor si RACTER podría "transmogrificarse" a disquette de 20 centímetros. Se consultó a RACTER. "Si 'podemos transmogrificarme sobre disquette de veinte centímetros' se le hubiese ocurrido a un pesimista, a él le hubiera podido parecer que era pesimismo". Posteriormente resultó que el equipo de los Owens no permitía la transmogrificación.

En otra ocasión, Terry Owens le preguntó a RACTER cuánto dinero debería invertir en publicidad. "Muchísimo dinero, porque, Terry, la gente se lo creerá", replicó RACTER.

Al final del artículo de mayo hice mención de un nuevo candidato a castorcito afanoso pentaestado [véase "Juegos de ordenador", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1984]. En diciembre, George Uhing, de Bronx, Nueva York, halló una máquina de Turing pentaestado que imprime 1915 unos antes de detenerse. La máquina de Uhing se reproduce en la figura 6.

Para descubrir lo que la máquina hará en el estado *B*, por ejemplo, examinemos la fila que porta esa etiqueta. La fila está subdividida en una porción superior y una inferior, que declara las respuestas de la máquina a un 0 y a un 1, respectivamente. Si la máquina lee un 1 en su cinta, entra en el estado *D*, imprime un 0 en la cinta y avanza después una casilla hacia la izquierda. En la tabla, *H* significa que la máquina se detiene.

ESTADO	ENTRADA	ESTADO SIGUIENTE	SALIDA	DIRECCION
A	0 1	B C	1 1	DERECHA IZQUIERDA
B	0 1	A D	0 0	IZQUIERDA IZQUIERDA
C	0 1	A H	1 1	IZQUIERDA IZQUIERDA
D	0 1	B E	1 1	IZQUIERDA DERECHA
E	0 1	D B	0 0	DERECHA DERECHA

6. *¿Un castor afanoso pentaestado?*

Uhing, que hace trabajos de programación para una compañía de óptica de Manhattan, decidió buscar el castorcito afanoso pentaestado después de leer esta sección. Se valió de un microprocesador Z-80, que ejecutaba un programa escrito en lenguaje ensamblador a fin de supervisar una segunda máquina: un simulador de máquina de Turing, cuya construcción costó a Uhing menos de 100 dólares. Esta máquina pasa por siete millones de transiciones, correspondientes a la máquina de Turing, cada segundo. Cada transición consiste, sencillamente, en consultar una tabla como la que vemos arriba. Uhing parece decidido a encontrar el castorcito afanoso de cinco estados. ¿Servirá la máquina presente? El candidato apareció después de que el ordenador de Uhing funcionara durante un mes. Que yo sepa, sigue en marcha.

Allen H. Brady, de la Universidad de Nevada en Reno, describe la máquina de Uhing con el calificativo de "pasmosa". ¿Qué probabilidades tiene de descubrir un castor afanoso de seis estados? "No tiene absolutamente nada que hacer", opina Brady.

El reto lanzado por Lee Sallows sobre pangramas computarizados ha sido recogido por varios lectores más. Quienes deseen leer la propia narración, escalofriante, de Sallows, al respecto de su aventura pangramática analógico/digital, "In Quest of a Pangram", la encontrarán en el número de primavera de *Abacus*.

Taller y laboratorio

Experimentos con el motor de combustión externa de fluido, que está provisto de pistones líquidos

Jearl Walker

El motor de fluido es un singular artefacto cuyo nombre procede de sus pistones líquidos. Al igual que su pariente próximo, el motor Stirling de pistones sólidos, inventado en 1816 por el reverendo Robert Stirling, de Escocia, resulta un buen auxiliar para estudiar experimentalmente ciertos aspectos de la termodinámica. De estos motores, algunos podrían servir asimismo de bombas de riego económicas. Colin D. West, del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, ha estudiado varios. En sus investigaciones se basa gran parte de este artículo.

El funcionamiento de un motor de fluido podemos describirlo imaginando un par de vasos comunicantes juntos [*véase la figura 1*]. El vaso de la izquierda se llama generador y el de la derecha transmisor. Ambos contienen agua u otro líquido. Un tubo de menor sección discurre por arriba y une las dos bocas del generador con la boca izquierda del transmisor; el aire puede así moverse en vaivén entre un vaso comunicante y otro. La energía que se desarrolla en el motor se cede al exterior por la boca derecha del tubo transmisor.

En el dispositivo se engendra una energía porque el extremo superior izquierdo del generador se mantiene caliente merced a una fuente calorífica externa, en tanto que el extremo correspondiente de la derecha se mantiene frío mediante una fuente de refrigeración externa, o bien, simplemente, porque el líquido no recibe calor en esa parte. La rama izquierda del generador es, en realidad, un cilindro caliente; la derecha, un cilindro frío.

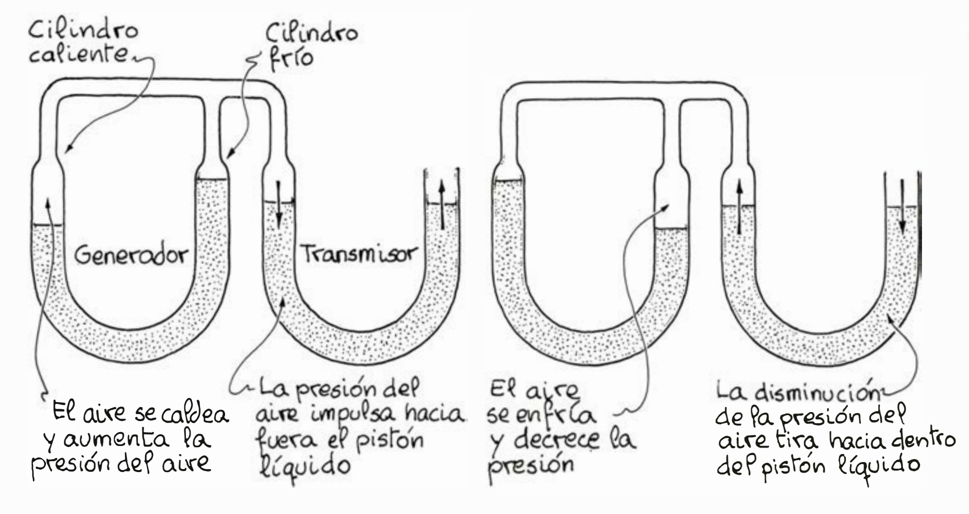
El motor se pone en marcha encendiendo la fuente calorífica. Entonces, cuando la temperatura crece lo suficiente, el agua se desestabiliza y comienza a oscilar ligeramente entre las dos ramas del generador. Cuando el agua pasa del cilindro caliente al frío, se impulsa aire del tubo de enlace al interior del cilindro caliente. Y, como ese aire se calienta, aumenta la presión en el seno del tubo de enlace y empuja hacia abajo la columna de agua de la rama izquierda del transmisor, con lo que se eleva el agua en la rama derecha. Ahí está la energía aprovechable para realizar trabajo.

El ciclo finaliza cuando el peso del agua del cilindro frío obliga a que pase líquido desde el mismo hacia el cilindro caliente. Ese movimiento del agua arrastra aire hacia la rama fría, donde éste se enfría y remite su presión. Para entonces, el peso del agua hace que descienda el nivel en la rama derecha del transmisor, desde su altura máxima. Además, la baja presión reinante en el generador coadyuva a impulsar el agua del transmisor hacia el generador. Si el agua de éste sigue oscilando, las variaciones en la presión del aire producen las consiguientes oscilaciones del agua del transmisor y, en consecuencia, el nivel en la rama derecha de éste desplaza un gran volumen. Así pues, el agua contenida en el transmisor puede funcionar como un pistón y realizar trabajo.

Para que el sistema funcione de un modo eficaz y ceda una energía neta útil, la oscilación en el transmisor debe ajustarse de modo que su frecuencia iguale la frecuencia de la oscilación en el generador. Ello se logra combinando adecuadamente el diámetro del transmisor y la cantidad de agua que contiene éste.

Si el tubo transmisor es demasiado estrecho o contiene excesiva agua, el aumento de la presión del aire en el generador no bastará para que el agua de la rama izquierda del transmisor desplace un volumen grande. Con poca agua, ésta avanza con suma facilidad. Entonces, cuando se trasiegue el aire del cilindro frío, parte de éste podrá penetrar en el espacio que quede libre en el transmisor. Y, como ese aire no está caldeado, la presión no subirá mucho. Cuando en el generador la presión del aire varía insuficientemente, los movimientos hacia dentro y fuera del agua del transmisor requieren cantidades de energía casi iguales y, por tanto, quedará muy poca para el pistón de salida.

Hay que aprestar algún medio para mantener la oscilación del agua del generador. Un procedimiento consiste en montar el motor sobre un pivote y conectar un resorte entre el transmisor y el suelo. Así, cuando oscila el agua del transmisor, el desplazamiento de su peso pone en movimiento el resorte y



1. Funcionamiento de un motor de fluido

éste mantiene las oscilaciones del agua del generador.

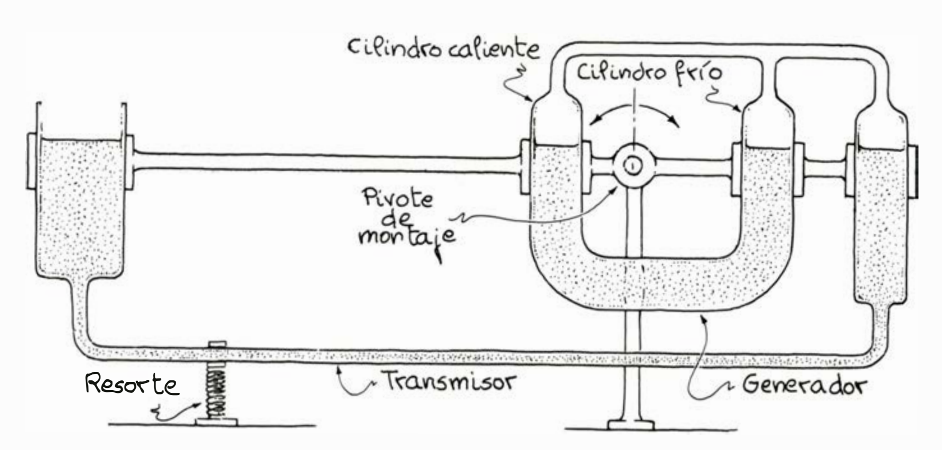
Otra técnica se basa en el retorno parcial, o retroacción, de la energía del agua que oscila en el transmisor [*véase la figura 3*]. Para ello, ese tubo se conecta al generador bajo la rama que hace de cilindro caliente. Como resultado, ambos cilindros, frío y caliente, contendrán cantidades de agua desiguales. (En cada caso, el volumen se mide desde el nivel del agua en el cilindro hasta la unión con el transmisor. Esa distancia es corta en el cilindro caliente y, por ello, el volumen de agua que el mismo contiene es más fácil de mover que el mayor volumen contenido en el cilindro frío.)

En el generador y transmisor la frecuencia de oscilación es la misma; pero entre ambos movimientos hay un desfase de unos 90 grados. En la primera etapa, el nivel del agua está al máximo en el cilindro caliente y entre el punto medio y el mínimo en el cilindro frío. En el transmisor, el nivel desciende atravesando el punto medio.

Cuando baja el nivel en el cilindro caliente, en el frío sube rápidamente porque recibe agua del cilindro caliente y del transmisor. Entonces se desplaza aire hacia el interior del cilindro caliente, donde se caldea y aumenta la presión del aire en el generador. Como el agua encerrada en el cilindro caliente se mueve sin dificultad, la creciente presión del aire la impulsa hacia abajo rápidamente. Parte del agua actúa sobre el transmisor e impele hacia arriba el agua contenida en la rama derecha. Cuando el agua del cilindro caliente llega a su nivel mínimo, el agua del transmisor sigue subiendo porque éste sigue extrayendo agua del cilindro frío. Esa elevación continuada del nivel en el transmisor provoca un descenso del nivel en el cilindro frío.

En el momento en que el nivel del líquido en el transmisor alcanza su máximo, en el cilindro frío desciende, elevando el nivel en el caliente. A la vez, se lleva aire al cilindro frío del generador, donde se enfría. En virtud de ello, cae la presión en el generador. Cuando comienza a descender el nivel en el transmisor, se impulsa agua hacia el generador. Y, otra vez, el agua del cilindro caliente se mueve fácilmente, por lo que el agua procedente del transmisor irrumpe en dicho cilindro, ayudando a que en éste suba el nivel.

Esta interacción entre el transmisor y el generador ayuda a mantener la oscilación ininterrumpida del agua de este último, pese a la pérdida de energía por viscosidad. Si el nivel en el transmisor se acerca a su máximo, la rama de salida está extrayendo agua del cilindro caliente. Cuando en el transmisor el nivel desciende hacia el punto medio, el agua que contiene está introduciendo agua en el cilindro caliente, haciendo que, en éste, se eleve el nivel.



2. Motor de fluido montado sobre balancín mecánico

¿Ha habido amplificación de potencia? ¿Puede calificarse de motor a este sistema? Aunque, durante la impulsión hacia fuera del agua, se suministró potencia al transmisor, para impulsar el agua de regreso al generador se consumió potencia. Si las potencias que intervienen en ambos movimientos son iguales, no hay amplificación neta.

La respuesta es que esas potencias no son iguales, porque varía la presión del aire en el generador. Cuando el agua del cilindro caliente es impelida hacia abajo para entrar en el transmisor, la presión del aire es alta. Por ello, la potencia que impulsa hacia arriba el agua del transmisor es de un valor crecido. Pero cuando el agua se impulsa de retorno al generador, se hace contra una presión de aire más baja y se necesita menos potencia. El sistema adquiere así una ganancia de potencia neta y es posible acoplar la salida a otro dispositivo sobre el que realizar trabajo.

En algunos motores fluidos, la energía suministrada por el foco calorífico vaporiza parte del agua. Pero, aunque esto consuma no poca energía, el aumento de vapor de agua contenido en el aire supone unas variaciones mayores en la presión del mismo y, con ello, el motor genera más potencia.

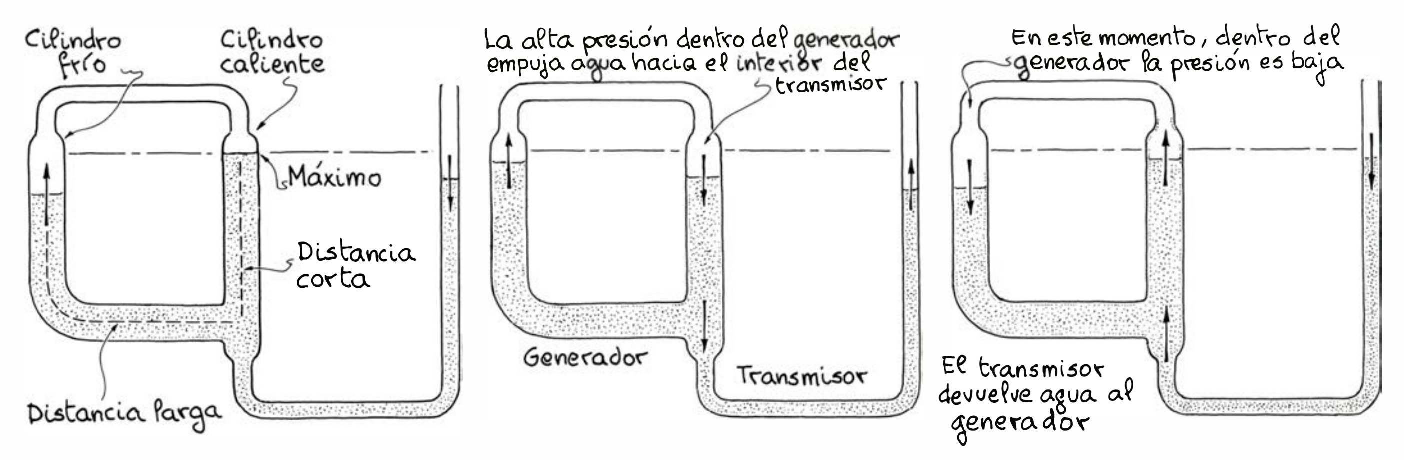
Casi todo el interés que despiertan los motores fluidos se centra en su potencialidad como bombas. Hay una técnica basada en el llamado montaje en serie. Consiste en unir un tubo de bombeo vertical a una de las ramas del transmisor [*véase la figura 4*]. Ese tubo contiene dos válvulas de contrapaso instaladas de modo que el agua sólo pueda fluir por ellas hacia arriba. Al pie del tubo se encuentra la masa de agua que ha de bombearse.

Cuando la presión del aire es baja dentro del generador, del transmisor pasa agua al generador. Se aspira agua del depósito, la cual atraviesa la válvula inferior. Cuando la presión del aire dentro del generador es alta, éste impele agua hacia el interior del tubo de bombeo, forzando una descarga en la válvula superior. Este ciclo, repetido indefinidamente, constituye el efecto de bombeo.

Un sistema mejor es el montaje en paralelo [*véase la figura 5*]. Aquí, el tubo de bombeo vertical se monta entre el generador y otro tubo vertical que es prolongación del transmisor. El volumen de agua que atraviesa el transmisor es mayor que el que atraviesa las válvulas. Como el transmisor se ajusta a la frecuencia de oscilación del generador, las oscilaciones del primero proporcionan una retroacción que ayuda a mantener las oscilaciones del segundo. Este montaje funciona con más uniformidad.

Con tubos de vidrio puede construirse un motor de fluido. David Herbert, del Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Inglaterra, ha creado un dispositivo de este tipo [*véase la figura 6*]. Lo elevado de las temperaturas y sus amplias variaciones le obligan a emplear vidrio borosilicatado. Las válvulas para el tubo de bombeo son cuentas de vidrio, o bien bolas de cojinete. Como foco calorífico para el transmisor utiliza una lámpara de proyector halógena de cuarzo de 16 watt.

Motores similares (e incluso mayores) se ponen en marcha con luz solar si se la enfoca con una lente sobre el brazo del generador. (Servirá una lente de Fresnel barata, de las hechas en plástico.) El foco debe encontrarse



3. Interacciones entre los tubos generador y transmisor

aproximadamente en el nivel de agua medio del cilindro caliente. Para intensificar el efecto, se monta un reflector en el reverso del cilindro, de modo que devuelva parte de la luz a través del agua. También puede incrementarse la absorción de calor ennegreciendo un costado del cilindro. Otra posibilidad válida consiste en oscurecer el agua agregándole tinta.

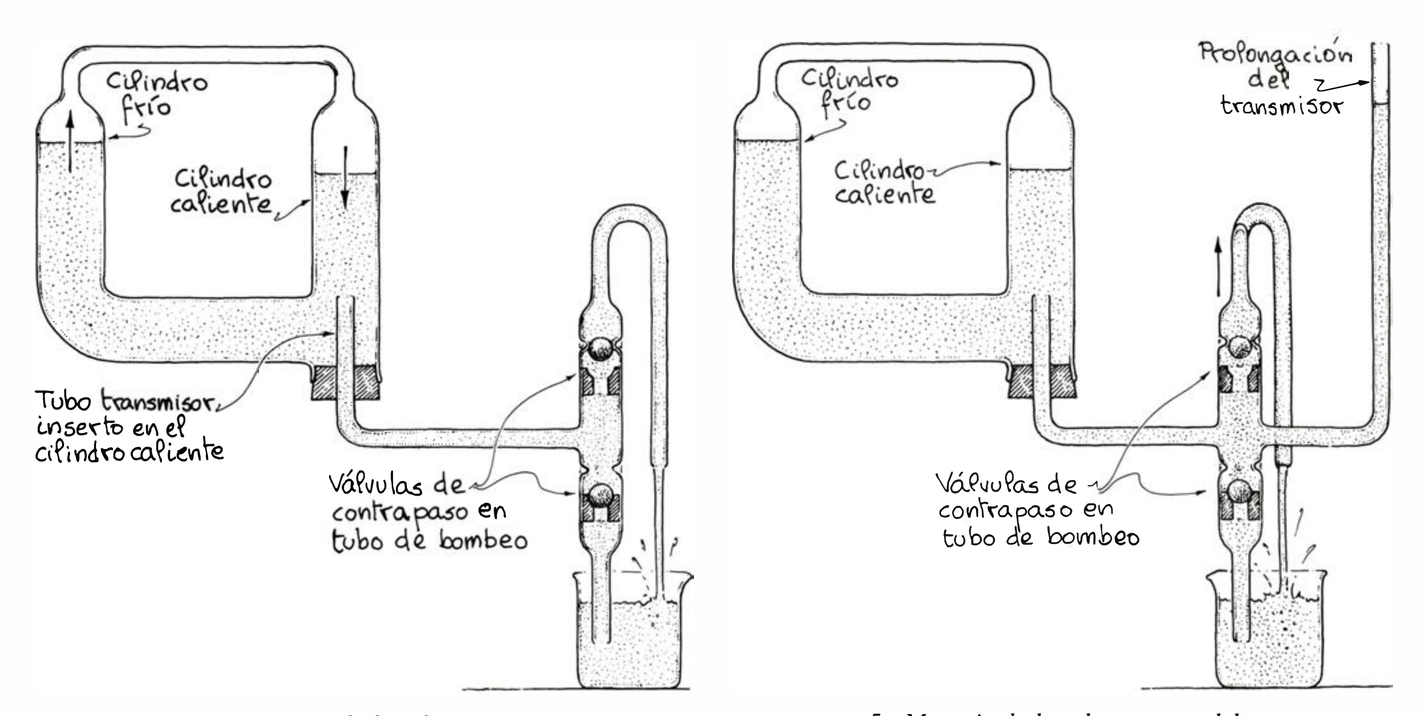
Este tipo de motor de fluido puede accionarlo hasta una sencilla llama. John Geisow, del Atomic Energy Research británico, ha ideado un motor caldeado por una lámpara de alcohol o una bujía. Para ello emplea un trozo de chapa de aluminio delgada que va desde la punta de la llama hasta ponerse en contacto con el cilindro caliente. La tira metálica la apoya inclinada contra el cilindro, de modo que el frotamiento la mantenga en posición. Tal tira canaliza por convección el calor hacia el cilindro y también lo comunica a éste por conducción a través del metal.

Un grupo del mismo laboratorio ha ideado un motor de fluido basado en un tarro de frutas de vidrio (de aproximadamente un litro de capacidad). De transmisor hace un tubo arrollado que introducen en el tarro. Su longitud es de 2,14 metros y su diámetro exterior de nueve milímetros. (Puede ser hasta 14 centímetros más corto y hasta 36 centímetros más largo.) Este tubo lo arrollan ocho veces en círculos de 8,5 centímetros de diámetro exterior. Un extremo de esta espiral encaja en el cilindro caliente del generador, que es un vaso comunicante montado en la tapa del tarro. El otro extremo lo enlazan al tubo de bombeo mediante un tubo de plástico que no se retuerza.

El generador puede hacerse soplando el vidrio. O podemos conectar dos cilindros de vidrio con un trozo corto de tubo de plástico. De foco calorífico sirve un secador de cabello que funcione a alta temperatura; pero lo mejor es un soplador industrial de aire caliente.

Sin tubo de bombeo el motor precisa de pocos ajustes. Pero con él, hay que reglar cuidadosamente los niveles de agua en los cilindros. Es asimismo crítica la longitud de tubo transmisor inserta en el cilindro caliente. Este motor, correctamente ajustado, bombea hasta 19 litros por hora.

West ha diseñado un motor de fluido basado en la retroacción líquida [*véase la figura 8*]. La parte delantera y la posterior son planchas acrílicas transparen-



4. Montaje de bombeo en serie

5. Montaje de bombeo en paralelo

tes de unos tres milímetros de espesor. Entre ambas sitúa tiras acrílicas de unos diez milímetros. El foco calorífico es una resistencia bobinada de tres watt y 20 ohm. Los cables de conexión de ésta atraviesan la tapa trasera (aislados con pegamento que impida las fugas) para unirse a un transformador de baja tensión como los utilizados en los timbres de puerta. Este alimenta de corriente alterna a la resistencia, a una tensión de nueve volt y una potencia de cuatro watt. Estas cifras sobrepasan la potencia nominal de la resistencia; ahora bien, como la resistencia se halla sumergida en agua permanece bastante fría. No necesita aislar los cables de la resistencia porque, en el líquido, la fuga de corriente entre ellos es mínima.

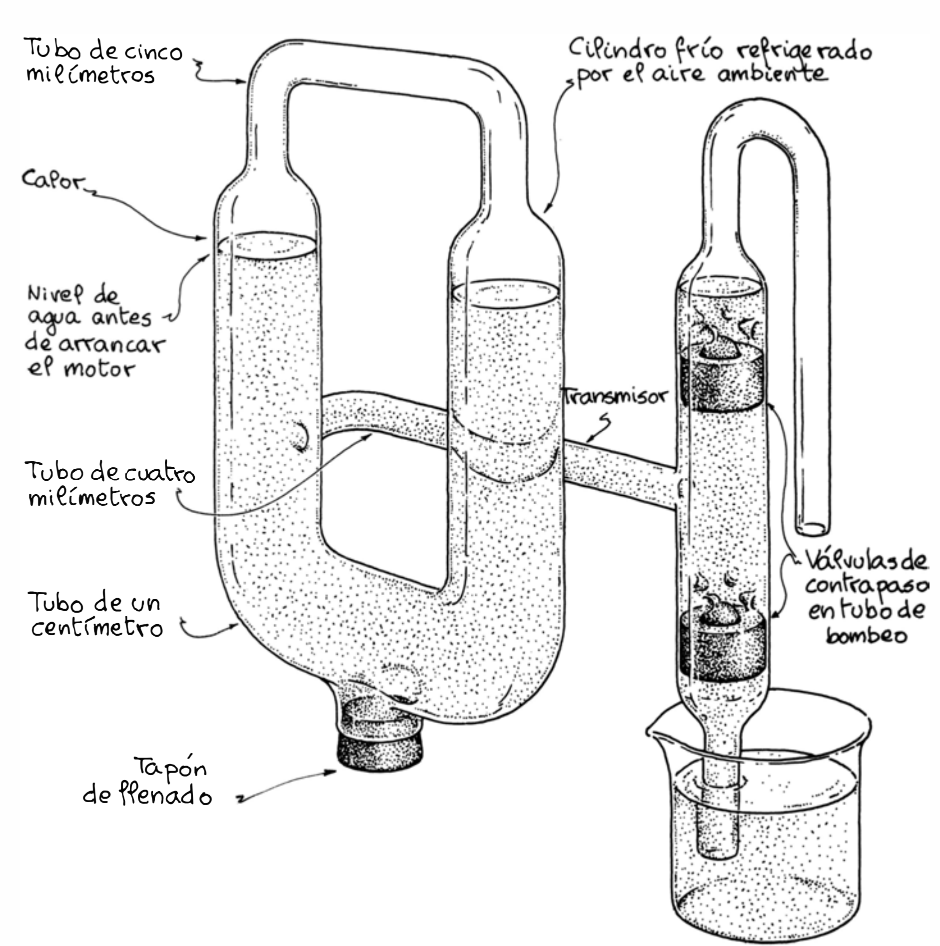
Para aumentar el rendimiento de su máquina, West añade a veces azúcar al agua (un 30 por ciento en peso). El azúcar, si bien aumenta la viscosidad del líquido, dificultando el mantenimiento de las oscilaciones, también reduce espectacularmente la pérdida de calor en el líquido del cilindro caliente. Cuando el sistema contiene azúcar, West aplica 12,6 volt a la resistencia.

¿Por qué aumenta el rendimiento de la máquina con el azúcar? Ocurre que el agua, al moverse hacia abajo en las oscilaciones, establece una fina capa límite contigua a la pared del cilindro. La viscosidad impide que tal capa se mueva. Sin azúcar, la capa límite es lo bastante tenue para que el agua transmita calor a la pared, desde donde se pierde en el aire ambiente. Por tanto, resulta difícil mantener así una temperatura conveniente en el cilindro caliente. Pero el azúcar aumenta la viscosidad, engrosa la capa límite y reduce la pérdida de calor.

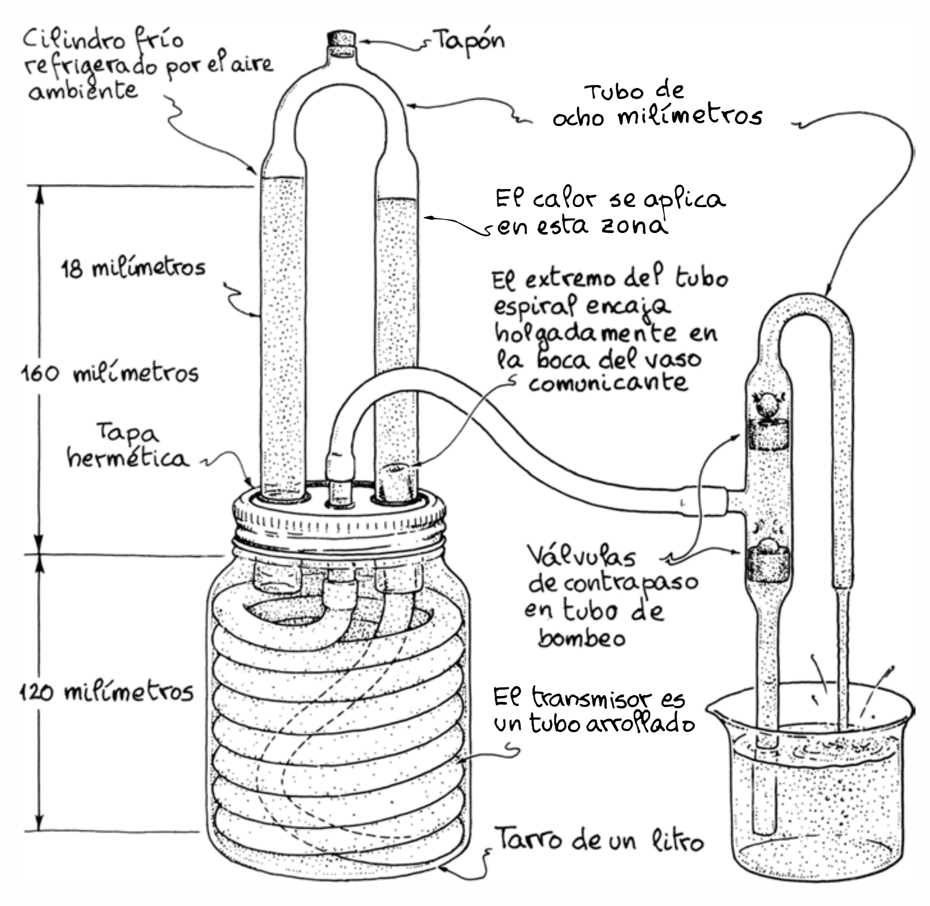
En el uso de azúcar West aconseja precaución, si no queremos echarlo todo a perder, especialmente si el motor deja de funcionar durante un rato (el azúcar sale de la solución y forma una pastilla) o si la resistencia se recalienta (el azúcar se carameliza). La glicerina u otra sustancia afín lo reemplazarán bien.

West ha construido en madera otro motor de fluido [*véase la figura 9*]. La tapa frontal y la trasera miden, cada una, 32 centímetros de longitud por 15 de altura, con un grosor de 1,9 centímetros. Los espaciadores entre ambas tapas son de 3,8 centímetros de ancho y 1,9 centímetros de grueso. El conjunto se mantiene unido merced a tornillos de latón y pegamento estanco.

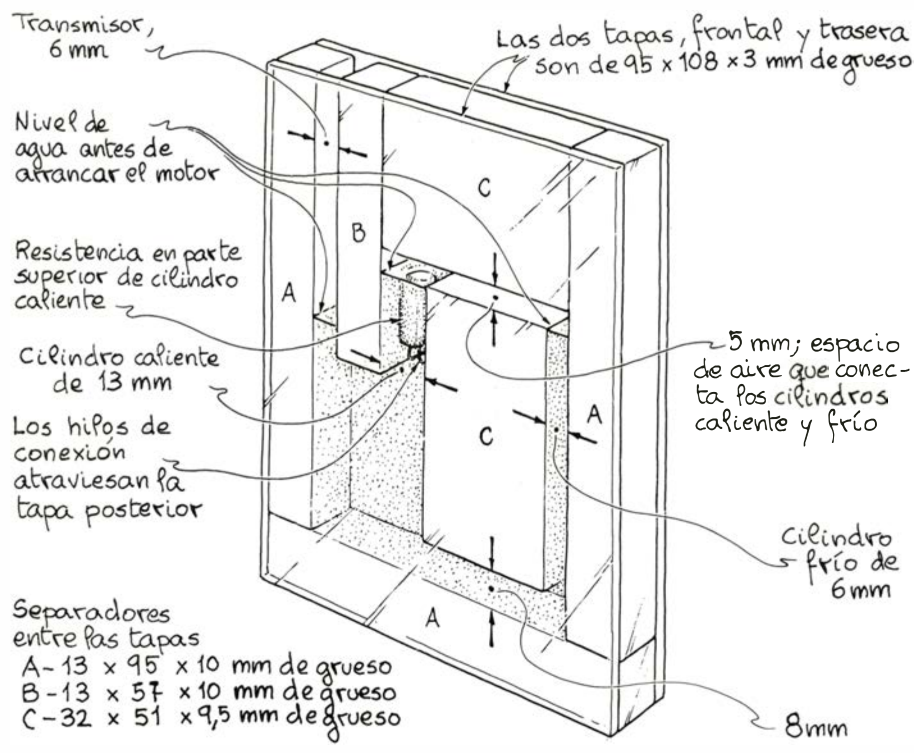
El cilindro caliente de este motor lo caldea con una resistencia de 10 ohm y



6. Bomba de fluido de David Herbert



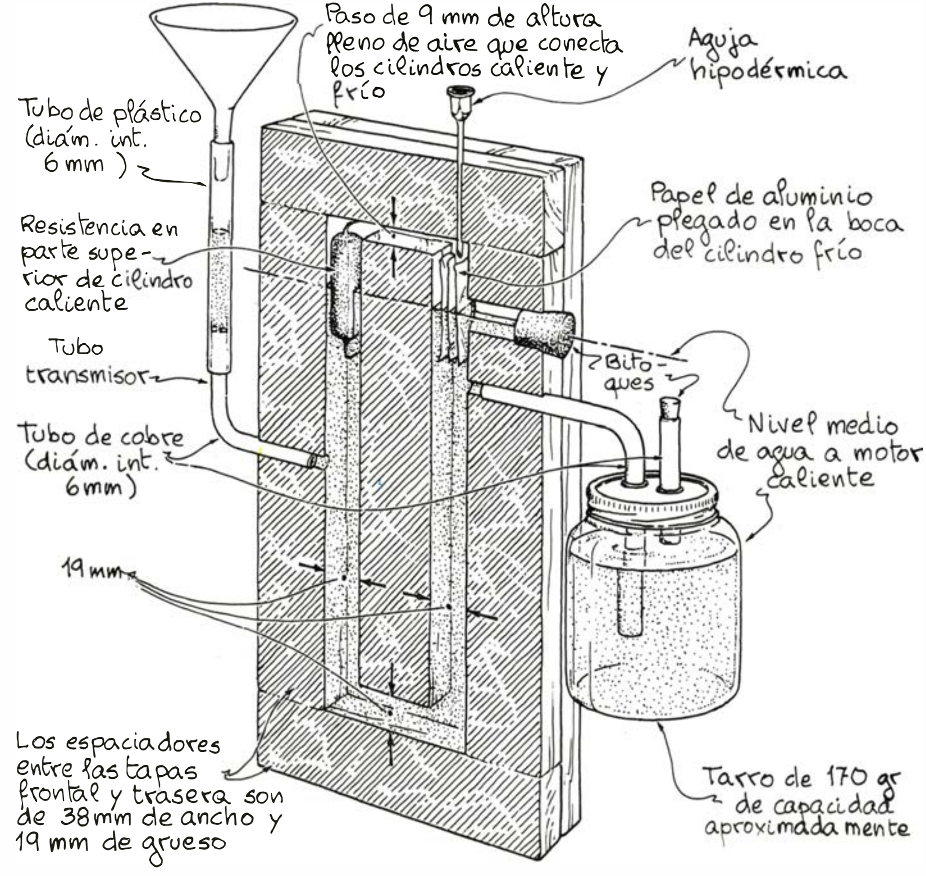
7. Motor de fluido con un tarro de fruta



8. Una versión en plástico de Colin D. West

10 watt. De ella parten los cables de conexión que se unen a unos pequeños pernos atornillados a la madera. Estos se hallan conectados a un transformador que funciona a 12,6 volt, por lo que la potencia comunicada a la resistencia es de unos 15 watt.

La parte superior del cilindro frío contiene una hoja de papel de aluminio plegada que sirve para uniformar la temperatura en ese lugar: en una etapa del ciclo el papel recibe calor del aire caliente y, en otra, lo cede al agua. Una lata de agua sujeta al cilindro frío pro-



9. Motor de madera de West

porciona una refrigeración suplementaria. Cuando, en el motor, aumenta la presión del aire, parte del agua del cilindro frío es impulsada a la lata. En ésta, se mezcla con el agua ya contenida en ella y pierde el calor que recogió del papel. Cuando disminuye la presión del aire en el motor, se obliga al agua enfriada a salir de la lata.

El transmisor lo construye de tubo de plástico transparente. El motor lo llena con un embudo instalado arriba. En la parte superior del motor, West monta una aguja hipodérmica sujeta con caucho de silicona, cuya misión estriba en mantener la presión del aire en el transmisor cercana a la presión atmosférica. Sin la aguja, el motor tendría que abrirse de vez en cuando para aliviar la presión.

Para mejorar el funcionamiento, en muchos motores de fluido, especialmente en los mayores, en el extremo superior de la columna fría se inserta un papel de aluminio plegado o un panal cerámico. A este fin sirven incluso pajas de beber refrescos. Este material se destina a recibir el calor procedente del aire caliente que llega del cilindro caliente. Luego, cuando en el cilindro frío sube el nivel de agua, el material se enfría. (Se evitará todo material con orificios suficientemente pequeños para retener agua por tensión superficial, ya que no dejará que el nivel oscile adecuadamente.) En los motores de mayor tamaño puede que se necesite un material similar en el tubo de transvase de aire entre los cilindros caliente y frío. Sin embargo, en los motores en los que interviene la evaporación del agua, el material que encontremos en el tubo de enlace resultará irrelevante.

Los motores de fluido son generalmente de arranque automático. Las oscilaciones se inician cuando la temperatura en el cilindro caliente crece lo suficiente. Pero si el motor depende de un sistema de balancines, quizá haya que cebar las oscilaciones a mano. Una motobomba podría necesitar una ayuda similar.

Afirma West que los motores de fluido ofrecen muchas posibilidades para la experimentación. ¿Cuáles son los mejores parámetros de dimensiones y caldeo? Si el motor no se diseña como bomba, ¿significaría una mejora un líquido distinto del agua? La sección de bibliografía recoge un libro de West que trata de estos motores. En él se representan más diseños y montajes de dispositivos de bombeo, junto con la exposición de los fundamentos físicos que justifican su funcionamiento.

Libros

Neurosis, paleontología, comportamiento estocástico, ciencia para jóvenes y Leakey

Pedro Laín Entralgo, Jaume Truyols, F. J. de la Rubia y M. G. Velarde, Luis Alonso y Arturo Valls

ORÍGENES HISTÓRICOS DEL CONCEPTO DE NEUROSIS, por José María López Piñero. Alianza Editorial; Madrid, 1985. Toda investigación histórica solvente lleva dentro de sí, tácita o expresa, una referencia al origen de la materia de que trata. Estudiar la política religiosa de Fernando VII, por ejemplo, implica una toma de posición ante lo que hasta entonces había sido la realidad histórica del catolicismo español, aunque los nombres de Recaredo y Felipe II no vengan a la pluma del historiador, ni tengan por qué hacerlo. Y nunca será de veras solvente una investigación histórica si en ella no se aúnan el rigor en la documentación, la seriedad en la interpretación y la elegancia en la exposición.

Con todos estos requisitos cumple magistralmente este pequeño libro de José María López Piñero. La referencia a los orígenes, expresa ya en el título, se hace precisa y bien articulada noticia en el capítulo I; el lector, en efecto, puede seguir en él las vicisitudes que en los albores de la medicina moderna experimenta el concepto de "enfermedad nerviosa", a partir de Thomas Willis y Thomas Sydenham, la ulterior creación del término "neurosis", obra de William Cullen, y la metódica incardinación de las dolencias con él denominadas en el sistema nosológico y nosotáxico del propio Cullen. El rigor de la documentación transparece con fuerte evidencia desde las primeras páginas; buena lección para los médicos que se acercan a la historia de su saber olvidando su propia exigencia ante la medicina que les parece actual. No hay historiografía solvente sin hermenéutica. El documento vale historiográficamente no sólo por lo que su letra dice, también por lo que su letra significa; esto es, por lo que su autor quiso decir a sus lectores (sentido intencional de la fuente) y por lo que el contenido del texto dice al historiador y a la situación histórica en que éste existe (sentido impletivo de la fuente). Lo cual, para que la interpretación sea de veras seria, exige fidelidad a la letra del texto, lealtad para con la persona de su autor y conocimiento preciso de la situación en que el texto es leído. Cumpliendo perfectamente tales condiciones es seria la interpretación de los textos que, desde Sydenham hasta Charcot, tan copiosa y rigurosamente ha utilizado López Piñero. Textos por él comentados e interpretados con la sobria claridad que, como Ortega más de una vez dijo, constituye la cortesía del filósofo y debe constituir –añado yo– la urbanidad del historiador.

En cuatro capítulos divide López Piñero su exposición. Como he dicho, en el primero estudia la primitiva constitución del concepto de neurosis, obra sucesiva de Willis, Sydenham y Cullen, y su resuelta aceptación por los médicos británicos y continentales que leen los libros de este último. El segundo expone la varia suerte de ese concepto en las dos corrientes que integran la medicina alemana de la primea mitad del siglo XIX: la entre osada y pintoresca aventura de la *Naturphilosophie* (la especulación de los médicos que pretenden entender la enfermedad con arreglo a los principios y los métodos de la filosofía idealista de la época, en primer término la de Schelling) y el eclecticismo de los clínicos sensibles a las importantes novedades que entonces ofrecía la medicina anatomoclínica parisiense. La sucesiva adaptación de la noción de neurosis a las exigencias del pensamiento anatomoclínico –por tanto: la creación del concepto de "localización funcional" y su aplicación al enfermo neurótico–, constituye el contenido del tercer capítulo. El cuarto, en fin, se halla consagrado a la concepción de la neurosis por parte de la mentalidad fisiopatológica: la neurosis como conjunto de desórdenes funcionales más o menos específicamente localizados.

Con estricta fidelidad al título del libro, el autor llega en su exposición hasta la víspera misma de los dos grandes sucesos que inician la historia actual del concepto de neurosis. Por una parte, el auge y la declinación de la obra de Charcot. Aunque la investigación ulterior haya superado los presupuestos neta y radicalmente anatomoclínicos de la concepción charcotiana de la histeria –la *grande névrose*, entidad nosográfica bien delimitada y consecuencia sintomática de una "lesión transitoria" del sistema nervioso central–, ¿cómo no advertir que la neurofisiopatología de los últimos decenios obliga a considerar *también* neurológicamente, no sólo psicológica y biográficamente, la compleja patogenia de los cuadros neuróticos? Por otra lado, la genial e invasora obra de Freud y su paulatina penetración en el campo de la medicina interna a lo largo del proceso que jalonan el libro colectivo *Psychogenese und Psychotherapie körperlicher Symptome* (Viena, 1925), la constitución de la que yo he propuesto llamar "escuela de Heidelberg" (Ludolf von Krehl, Viktor von Weizsäcker, Richard Siebeck) y la universal difusión de la patología psicosomática norteamericana. *Incipit vita nova*, hubiese podido escribir López Piñero, a la manera del Dante, al término de su libro. Vida nueva del concepto de neurosis que, tras este excelente estudio de sus orígenes, López Piñero se ha obligado a describir y comentar con la debida minucia.

El término neurosis significa hoy varias cosas: un modo peculiar y diverso de enfermar, el propio de las neurosis *sensu stricto*; un tenue o bien visible componente del cuadro clínico de cualquier enfermedad, incluidas las más acusadamente orgánicas; un modo anómalo del comportamiento social de los individuos y de los grupos humanos. En la literatura médica, en la literatura literaria y en la prosa periodística, la palabra neurosis ha llegado a ser moneda corriente. De ahí la considerable utilidad que para los lectores menesterosos de claridad intelectual, médicos o no, tendrá la lectura de este luminoso y riguroso buceo en los orígenes de uno de los conceptos-clave de la medicina y la cultura de nuestro tiempo. (P. L. E.)

FÓSILES E HISTORIA DE LA VIDA, por George Gaylord Simpson. Prensa Científica, S.A.; Barcelona, 1985. Una visión simplista de las cosas quizá puede hacernos creer que intentar el acercamiento a un público no especializado de los progresos efectuados por una ciencia como la paleontología, cuyo desarrollo requiere de continuo la realización de campañas explorativas y de excavaciones en la superficie de la corteza terrestre para tomar contacto con el objeto de su estudio, el registro fósil, ha de ser una tarea sumamente fácil y agradecida. Pero esta visión in-

genua procede de una cierta idea que ordinariamente se posee de la paleontología, interpretada más como peripecia aventurera de coleccionistas que como auténtica disciplina provista de rigor científico. Para quienes piensan que lo que se denomina así no es más que un mero anecdotario de descubrimientos y de picantes disputas entre sus protagonistas, los paleontólogos, la aparición de un título como *Fósiles e historia de la vida* no ha de sugerir sino un elemento más que relate esa amena odisea humana dirigida a la búsqueda de las huellas de la vida primitiva.

Y sin embargo no es así. Va desencaminado quien esto piense. No se trata ni de un divertido libro de aventuras ni de un texto árido para especialistas del tema. *Fósiles e historia de la vida*, de George G. Simpson, es una obra dirigida a un público no especializado, escrita, tal como se indica en el prefacio, "sin dar por sentado que el lector tenga necesariamente un conocimiento técnico del tema". Intenta mantener –y yo creo que lo consigue totalmente– un difícil equilibrio entre el rigor del texto científico y la agilidad del ensayo divulgador, sin descender necesariamente a la trivialidad anecdótica de historias de descubrimientos, que en su mayor parte son de significación irrelevante para la comprensión de la ciencia y su desarrollo. Se trata de una visión del panorama completo de la paleontología, adaptada al tipo medio de lector de *Investigación y Ciencia* que, no siendo obligadamente experto en una disciplina como ésta, se halla interesado no obstante en lo que puede aportar al acervo cultural y a la cuestión de su origen como ser vivo.

El autor, George Gaylord Simpson, es una de las máximas figuras de la paleontología moderna. Especialista en mamíferos fósiles, ha realizado importantes contribuciones al tema, entre las que figuran el estudio y significado de las faunas sudamericanas del Terciario y el de diversos grupos fósiles, además de su fundamental aportación al conocimiento teórico de distintos aspectos de la paleontología y la evolución (taxonomía, sistemática, filogenia, biogeografía, etcétera). Esta labor la efectuó trabajando en el Museo Americano de Historia Natural de Nueva York y en el de Zoología Comparativa de Cambridge, e impartiendo docencia sucesivamente en las universidades de Columbia, Harvard y Arizona. Seguramente el papel más importante desempeñado por él, y que ha determinado su enorme influencia doctrinal en el mundo de la paleontología desde mediados de siglo, es el que llevó a cabo en la génesis de la llamada teoría sintética de la evolución, nacida de la concurrencia de puntos de vista pluridisciplinares, junto con otras personalidades de la talla de E. Mayr y Th. Dobzhansky, manifestadas en particular en la decisiva conferencia de Princeton de 1947. A Simpson se deben cuestiones fundamentales de la teoría sintética aportadas por él como resultado de su experiencia cotidiana como paleontólogo, tales como los conceptos de modalidades y ritmos evolutivos, en un intento de introducir la dimensión temporal en las ideas neodarwinistas procedentes de la experimentación desarrollada por los genetistas. Los libros *Tempo and mode in Evolution* (1944) y *The Major Features of Evolution* (1953), representan sus decisivas contribuciones al establecimiento de la teoría sintética.

Pero Simpson no se ha limitado en su extensa producción escrita a esas obras de tipo doctrinal y a los estudios concretos de paleontología de mamíferos, como los que hemos mencionado. También ha elaborado obras dirigidas hacia un público más amplio que el que podría interesarse por los libros anteriores. En 1953 había escrito ya *Life of the Past*, breve visión sinóptica de lo que es la paleontología y sus distintos enfoques posibles, pero el libro que ahora comentamos, *Fósiles e historia de la vida*, es una obra más rica en contenido y originalidad expositiva.

El libro está dividido en ocho capítulos que glosan diversos aspectos que contempla la paleontología. Los cuatro primeros se refieren a cuestiones que podríamos considerar como clásicas en la disciplina paleontológica: así, la constatación de los fósiles como restos de seres vivos, su clasificación como tales y su distribución en el marco espacio-temporal, con todas las implicaciones que ello presenta para la datación del registro estratigráfico. Aun admitiendo que esta parte corresponde inevitablemente a campos trillados, que han sido desarrollados con gran frecuencia en obras elementales de divulgación, la presentación de estas cuestiones está realizada de manera original y atrayente (todo lo original que pueda permitir el tema), con una exposición altamente sugestiva, a la que no es ajena la buena calidad de la parte gráfica que la acompaña.

Los capítulos 5, 6 y 7 corresponden a cuestiones de tipo interpretativo referidas al fenómeno de la evolución orgánica contemplada a través de la óptica del paleontólogo: "Extinción, origen y sustitución", "Ritmos y modelos de evolución", "Otros rasgos fundamentales de la evolución". Esta parte del libro posee un interés especial. Al lector no demasiado familiarizado con el tema le llamará probablemente la atención el ver hasta qué punto la paleontología (que acaso había interpretado tan sólo como disciplina cuya ambición se limitaba a la mera elaboración de un catálogo de reliquias del pasado) es capaz de contribuir a desentrañar el misterio de la evolución de los seres vivos y a descubrir los mecanismos que han regido este proceso; en estos capítulos en realidad no son ya los fósiles los que hablan, sino los propios organismos a quienes ellos presentan los que tienen la palabra y que le revelan su mensaje. Mas para el lector avisado, que conoce la problemática actual de la evolución, el contenido de estos capítulos posee además alicientes de otro orden. Siendo Simpson uno de los padres de la teoría sintética, es fácil adivinar que sea precisamente en esta clave interpretativa cómo están escritas las páginas de los capítulos indicados. Y este hecho, que podría parecer innecesario destacar por ser algo lógicamente esperado en un autor como él, en estos momentos, en que se ha cuestionado entera la teoría sintética de la evolución, adquiere un interés especial.

En efecto, desde 1972 e incluso antes, el acoso a que se está sometiendo los sinteticistas por parte de otros paleontólogos ha sido constante. A la teoría sintética se la suele acusar hoy de excesivamente inmovilista, de mostrarse relativamente impermeable ante las nuevas adquisiciones de la ciencia. En particular se le achaca el haber ido cerrándose progresivamente en un modelo rígidamente gradualista para explicar la evolución de las estirpes, cuando es notorio que en el darwinismo inicial existía una mayor apertura en este campo (si Darwin, por ejemplo, apuntaba a una posibilidad claramente gradualista, Th. Huxley se movía mejor en un cierto saltacionismo), y el llevar la selección natural más allá de lo que debe considerarse su ámbito propio. Frente al gradualismo filético, Eldredge y Gould contraponen el modelo que denominan del "equilibrio puntuado", que supone la existencia de crisis periódicas en la historia de una especie, interrumpiendo intervalos de estasia en que ésta permanecería inmodificada, para generar de este modo fenómenos de especiación cladogenética, punto de partida de nuevas formas.

Ciertamente la realidad del registro fósil muestra con mucha frecuencia discontinuidades aparentes en el seguimiento de la evolución de las estirpes (lo cual, dicho sea entre paréntesis, es lo que favoreció en los tiempos de

D'Orbigny el desarrollo de la paleontología estratigráfica), pero en general tales discontinuidades suelen imputarse al propio carácter incompleto de la representación que poseemos en los seres del pasado. El gran problema de la Paleontología viene dado habitualmente por estas limitaciones que presenta el registro fósil, no sólo incompleto y fragmentario, sino además sesgado en su representación. El problema está ahí y, como dice Simpson, "la precariedad del registro no se desvanecerá porque alguien decida ignorarlo", en alusión a la llamada de Gould de intentar liberarse del complejo del paleontólogo, admitiendo de una vez la consideración del registro tal y como viene dado. Según Simpson, el equilibrio puntuado no contradice la realidad de la teoría sintética, que nada opone a cambios de ritmo evolutivo y no es tan cerradamente gradualista como se le supone. Algunos conceptos esenciales del puntualismo, como la especiación alopátrida como fuente básica de nuevas especies, proceden en realidad de Mayr, otro de los padres del sinteticismo, que en su idea de la "población fundadora" lleva implícita toda la revolución genética necesaria para reconstituir un genotipo que resulte capaz de sustituir al de la población parental.

Para Simpson, uno y otro modelo ("y muchos más") aparecen tipificados en el registro fósil, y últimamente en el coloquio de Dijon (1982) se han puesto de manifiesto posiciones contrapuestas respecto a la aceptación rígida de modelos determinados de especiación.

Sea como fuere, lo cierto es que las nuevas adquisiciones científicas realizadas durante el intervalo de casi medio siglo que nos separa de la histórica reunión de Princeton, invitan a revisar el "status" actual de la teoría sintética y verificar si ésta sigue manteniendo su validez pese a las mismas. Modelos aparte, otras cuestiones suscitan ahora debate: el encadenamiento de mutaciones, el cambio evolutivo no imputable a selección (que eso sí afecta a la misma entraña de la teoría) con la renovada resurrección del concepto de macroe-

volución, que parecía abandonado (Stanley y otros). ¿Debe hablarse, pues, de crisis de la teoría sintética? Simpson no debe creerlo así cuando efectúa una réplica "sintética" a las posturas de sus objetores.

Por todo ello, y por mucho más, la lectura de estos últimos capítulos de la obra, escritos en la serenidad de sus ochenta años pletóricos de experiencia científica y vital, con el talante de quien se siente movido "a reflexionar y a enfrentarse con los enigmas del significado y la naturaleza de la vida y del hombre, así como también con los problemas de la conducta y los valores humanos" (léase el capítulo final, "Los fósiles y nosotros"), resultan de un interés excepcional realmente estimulante. Elisa Villa, paleontóloga, ha realizado una traducción del texto merecedora de todo elogio. (J. T.)

NOISE-INDUCED TRANSITIONS, por W. Horsthemke y R. Lefever. Springer Verlag; Berlín, 1984. El estudio del comportamiento estocástico o las fluctuaciones de sistemas fisicoquímicos, biológicos, sociológicos, etcétera, muy alejados del equilibrio ha alcanzado un gran auge en la última década, a raíz de averiguarse que las fluctuaciones dominan el comportamiento de tales sistemas cerca de puntos críticos, de bifurcación o de transición. El papel de las fluctuaciones, o del "ruido" como también cabe calificarlas, en la vecindad de tales puntos, donde el sistema tiene ante sí distintas posibilidades de evolución, es crucial para su futuro. Se comprende, pues, que un análisis que vaya más lejos que el puramente determinista reviste el mayor interés para una mejor comprensión de sistemas que operan en condiciones de desequilibrio, gobernados por leyes no lineales.

Suele hablarse de dos tipos de fluctuaciones o de ruidos: fluctuaciones *internas*, que se deben al hecho de que los sistemas se componen últimamente de un número finito de partículas o elementos, y fluctuaciones *externas*, o efecto azaroso del entorno sobre el sistema. La característica fundamental

que distingue las dos clases de fluctuaciones es su tamaño u orden de magnitud. En las internas, el orden de magnitud de las mismas, fuera de regiones críticas o de transición, es del inverso del tamaño o volumen del sistema; en la mayoría de los casos su efecto será despreciable. El ruido externo, por el contrario, no depende del tamaño del sistema; su efecto puede ser importante incluso en el límite termodinámico de un sistema que crece enormemente y del que sólo nos ocupamos de sus propiedades locales dejando al margen el problema de contorno de los sistemas reales finitos.

El libro de Horsthemke y Lefever trata de este último tipo de fluctuaciones. En particular, de la posibilidad de que tales fluctuaciones engendren estados o fases accesibles al sistema y transiciones entre esos estados no predichas, ni tan siquiera admitidas, por un análisis puramente determinista. Estos fenómenos de transición forman un prometedor campo de investigación en el que los autores han sido pioneros y líderes con sus numerosos trabajos publicados. Su libro es la primera monografía sobre el tema.

Avancemos, antes de pasar a un análisis más pormenorizado de su contenido, que el libro es muy completo, en el sentido de que el estudioso que tenga un mínimo conocimiento de la materia sabe, al finalizar su lectura, prácticamente todo lo que se ha hecho en este campo.

Después de un primer capítulo introductorio, donde se analiza el origen y la influencia del ruido interno y externo en la evolución del sistema, se presentan métodos para su estudio. Los elementos fundamentales de la teoría de probabilidades (cap. 2), los procesos de difusión (cap. 4) y las ecuaciones diferenciales estocásticas (cap. 5), que forman la base matemática, se presentan de manera concisa y clara. Se hace especial hincapié en la diferencia entre los métodos de cálculo de Ito y Stratonovich.

Los restantes capítulos (6-9) forman la parte central del libro. Los métodos analizados en anteriores capítulos se aplican a diversas situaciones y modelos de interés que incluyen problemas genéticos, de dinámica de poblaciones, reacciones químicas, biestabilidad óptica, transiciones en cristales líquidos, inestabilidades electrohidrodinámicas, etcétera. En un primer análisis se considera la situación en que las fluctuaciones del entorno tienen las características de un ruido blando (es decir, sin memoria). Aun cuando este tipo de ruido no existe en la realidad, su uso resulta extremadamente útil, pues permite trabajar dentro del marco de los procesos de Markov, donde ya se han desarrollado métodos analíticos.

Justo es resaltar el apartado dedicado a la dinámica crítica del sistema, es decir, y por extensión de los conceptos de las transiciones de fase de equilibrio, de la evolución cuando nos acercamos al punto (crítico) de la transición inducida por el ruido. Se aborda la cuestión suscitada acerca de la presencia de lo que se conoce como "amortiguamiento crítico" en las transiciones de fase de equilibrio en las transiciones inducidas por ruido. Los autores demuestran, para una amplia clase de sistemas, que, cuando nos acercamos al punto de transición, el tiempo para producirse esta transición, que se manifiesta por el paso de una distribución de probabilidad estacionaria con un solo máximo (unimodal) a una con dos máximos y un mínimo (bimodal), crece de forma logarítmica, comportamiento completamente análogo al fenómeno de descomposición espinodal en la teoría de transiciones de fase de equilibrio. La analogía con la teoría de equilibrio parece, pues, bien fundada aun cuando los resultados no alcancen la generalidad deseada.

El caso más realista de ruido real (no blanco) se considera en los capítulos 8 y 9. El salirse del marco de los procesos de Markov imposibilita la obtención de resultados rigurosos, por lo que se consideran dos tipos de aproximación: el tiempo de correlación del ruido es muy pequeño, comparado con el tiempo característico de evolución del sistema macroscópico, y el límite opuesto de tiempo de correlación muy grande. El primer límite, que presenta indudable interés, permite comprobar la utilidad de la idealización de ruido blanco. La consideración, finalmente, de lo que se conoce como ruido dicotómico (sólo dos valores son permitidos para las fluctuaciones) posibilita el estudio analítico exacto del efecto del tiempo de correlación, evitando las dos aproximaciones anteriormente mencionadas. (F. J. R. y M. G. V.)

AVENTURAS CON ANIMALES PEQUEÑOS, por Owen Bishop. Editorial Labor; Barcelona, 1985. Colección Labor Bolsillo Juvenil. La revista matriz de *Investigación y Ciencia, Scientific American*, dedica la sección "Libros" de cada mes de diciembre a la reseña de las publicaciones científicas destinadas al lector infantil y juvenil. Una vez al año, coincidiendo con las venidas puntuales de San Nicolás, Papá Noel o los Reyes, el matrimonio Morrison pasa revista a las novedades que, ojalá, traerán tan venturosos visitantes en su zurrón a los niños y adolescentes de las familias más inquietas de medio mundo. Algún día nuestra revista prestará también la debida atención a ese sector bibliográfico del máximo interés para el futuro de un país. Y considerando que el mes de junio es buen momento para pensar en las vacaciones inmediatas de los escolares vale la pena intentar una primera aproximación.

¿En qué situación estamos? Dejemos por una vez la historia de nuestro abandono. Y de las honrosas excepciones. Como la de *Definiciones y elementos de todas las ciencias*, ampliamente difundida en la España de comienzos del XIX; *Las ciencias*, de Ramón Pomés, cuyo propósito deja explícito en las palabras introductorias: "Aprendamos a considerar la Ciencia como un auxiliar poderoso de la vida, y sin duda llegaremos a apreciarla en su verdadero valor, amándola y deseando conocer cada día más profunda y más completamente la inmensa, la inagotable riqueza de sus maravillosos secretos". Y por encima de todos, los *Elementos de Ciencias Físicas y Naturales*, a caballo entre el libro de texto y la lectura divertida. Su autor fue Eduardo Fontseré, catedrático de la Universidad de Barcelona, que contó para su confección con la ayuda, entre otros, de Francisco Pardillo, padre de la cristalografía española.

La ventaja de la colección en la que se inscribe *Aventuras con animales pequeños* es múltiple. Por un lado, los autores son reconocidos profesionales en su campo científico: Agustín Albarracín en la historia de la medicina (*Contra la muerte negra. Epidemias y vacunas*, n.º 44), Miguel de Guzmán en el de la matemática (*Cuentos con cuentas*, n.º 37), etcétera. Por otro, dominan la divulgación científica en su forma más difícil, la que tiene por interlocutor a los adolescentes. Su contacto con los alumnos, y con sus hijos, les permite cribar lo que es propio de la clase, lo que es complementario y lo que es entretenimiento instructivo. Se rompe así la terca costumbre de reservar los "libros de lectura" a las narraciones literarias. Sin caer en la obsesión destructora contraria; la colección cuenta con otros volúmenes igualmente escogidos de poesía (Machado, Alberti, García Lorca), leyendas, fabulación e historia de la cultura clásica.

Aventuras con animales pequeños obliga a tomar parte activa. La lectura llamada pasiva, subterfugio de indolentes, ha sido de antaño la frágil arma de nuestros ilustrados, capaces de rememorar las gestas de la Confederación de

Delos contra los persas, las leyes de Solón y los matices léxicos del dórico y el ático. Pero incapaces de reproducir siquiera las catapultas, las torres de asalto, los hornos cerámicos y, si me apuran, el herbario y los útiles de Hipócrates. El cerebro y la mano que Farrington quería destacar en el esplendor de la primera civilización de Occidente. (Disparate no menor sería arrumbar los estudios clásicos en aras de una modernización científica torpemente entendida.)

Mal comienzo sería regalar un microscopio caro cuando basta la lupa. Y a veces hasta sobra ésta: "Construye un microscopio con una gota de agua" (capítulo 5). Con una gota de agua, una lata, una cajita de madera, dos gomas elásticas, un clavo, un martillo y unas tijeras, se nos aclara luego. Pero nada más. ¿Qué podemos distinguir? Muchos organismos que se nos escapan a simple vista: *Euglena, Scenedesmus, Volvox, Closterium, Vorticella*, etcétera. Aprendemos así una divertida lección de diversidad orgánica. Pasemos a la genética. El libro nos convierte en seguidores de Mendel cruzando escarabajos de ojos negros y ojos perla. La genética molecular llegará más tarde, cuando los adolescentes conozcan suficiente química para entender qué es un nucleótido, una base nitrogenada y un puente de hidrógeno.

No tiene sentido denostar a los primeros zoólogos por considerar la oruga una especie distinta. Aunque seamos de los que hayan disfrutado echándole hojas de morera en agujereadas cajas de zapatos. Si los niños disponen de un par de botellas anchas de plástico, un retal de nylon, goma elástica, cinta adhesiva, algodón, un tarro de conservas y un pincel, podrán preparar un terrario donde esas larvas se conviertan en crisálidas y en mariposas adultas. La obra se acompaña de múltiples dibujos que recrean plásticamente los pasos a dar, por dónde recortar o cómo preparar un mantillo.

En la admiración fijaba Aristóteles el principio de la sabiduría; no el pasmo bobalicón de quien escucha o lee grandes hazañas. Descartes apostillaba, por su parte, que sólo conocemos una cosa cuando sabemos llevarla a la pluma. Las manos para escribir, para resolver un problema, para realizar un experimento o para construir una máquina son el espejo de nuestro cerebro. (L. A.)

ONE LIFE. AN AUTOBIOGRAPHY, por Richard Leakey. Michael Joseph, Ed.; Londres, 1983. Richard Leakey se autodefine como un africano de piel blanca, hoy de nacionalidad kenyata, que desde su nacimiento se ve rodeado de una inquietud familiar casi obsesiva por el descubrimiento de restos fósiles en la fértil región de Africa oriental. El medio ambiente no puede serle más propicio. Su padre, Louis Leakey, era ya conocido también como antropólogo por su publicación de una monografía en tres volúmenes sobre los Kikuyu, y trabajaba en el Coryndon Museum de Nairobi, que con su esfuerzo, y el de Richard más tarde, se convertiría en el National Museum of Kenya, el de las famosas siglas KNM que preceden a tantos restos fósiles de Homínidos. Su madre, Mary, ganó justo predicamento desde su descubrimiento en 1948 de un cráneo de *Proconsul*, datado en unos 20 millones de años.

Durante los primeros quince años de su vida, Richard acumula una increíble experiencia práctica de la naturaleza viva y petrificada del este africano; la fauna de mamíferos, aves, reptiles e insectos, en particular, le resulta tan familiar como la propia interpretación de los estratos donde yacen sus especies precursoras. Pero, a la vez, el joven Leakey se identifica más, en sus juegos primero y en sus ocupaciones luego, con los kenyatas nativos que con los colonos británicos. En 1951, las "actividades", como dice él, del Mau Mau no consiguen alterar sus relaciones y amistades con los que, al adquirir Kenya su independencia, serán compatriotas. Uno de éstos, Kamoya, codescubridora con R. Leakey de varios importantes restos de Homínidos. Esta primera parte de su autobiografía abunda en descripciones de sus actividades juveniles como proveedor de ejemplares, sobre todo insectos y aves, con destino a las colecciones de diversos museos.

Su profesionalización en el dominio de la paleoantropología arranca de 1958, en su primera visita a Olduvai Gorge, primer yacimiento donde se ensaya el método de potasio/argón, y en el que su madre había hallado el primer *Zinjanthropus*. Ello permite a la familia obtener subvenciones, particularmente generosas desde entonces de la National Geographic Society de los Estados Unidos, mientras Richard sigue aumentando su rica experiencia en preparar esqueletos, identificar huesos y capturar y observar numerosas especies de Primates (potos, galagos, babuinos, etcétera) cuya conducta llega a conocer en detalle. Otra mandíbula de *Zinjanthropus* la encuentran los Leakey en el lago Natron; durante los años 1963-1966 prosigue ayudando en las excavaciones de Peninj y Baringo.

A partir de ahora, R. Leakey va a sentir la falta de una preparación académica, universitaria o formal, llámese de cualquier modo, que integre y dé coherencia científica a sus observaciones y a sus futuros hallazgos.

La de 1968 resulta una fecha crucial en la vida de Richard. Comienza a explorar el lago Turkana, cuyos yacimientos han resultado desde entonces ininterrumpidamente fértiles y donde su principal objetivo era recuperar restos fosilizados de hombres primitivos. Sus excavaciones se ven entorpecidas por mil obstáculos: responsabilidades administrativas en el Museo Nacional, primeras molestias renales, dificultades en obtención de subvenciones, deformaciones periodísticas de sus hallazgos, etcétera. Y, siempre, el vacío de un título académico...

Los primeros descubrimientos en Koobi Fora, yacimiento KBS, en 1969 de huesos homínidos datados provisionalmente en 2,4 crones, plantean las dudas sobre si se trata de Australopitecinos, Habilinos o de otra especie de *Homo*. En cualquier caso, la importancia de los hallazgos determina el desarrollo de un proyecto, interdisciplinario e internacional de un amplio, experto y cambiante equipo de científicos que van a trabajar desde entonces en el yacimiento. En 1972 se encuentra KNM-ER-1470, que es presentado en la Sociedad Zoológica de Londres por el propio R. Leakey, consagrado ya paleoantropólogo excepcional. Esta gran satisfacción la oscurece la muerte de Louis, en octubre, tras un período en que las relaciones con su hijo no fueron del todo felices y de las que el lector saca la impresión de que no estuvieron ausentes pequeñas dosis de celos profesionales paternos. Para honrar la memoria de Louis Leakey, su hijo crea la Louis Leakey Foundation y el Centro para la Investigación de los Orígenes del Hombre.

Entre Koobi Fora y Nairobi, Londres y los Estados Unidos, Richard Leakey va a distribuir su vida profesional desde 1975. En los dos primeros lugares para proseguir y dirigir las excavaciones, en los Estados Unidos para pronunciar conferencias y recabar subvenciones y ayudas económicas y, en Londres, porque su disfunción renal exige cuidados más frecuentes cada vez. En 1975, en unos sedimentos de algo más de 1,5 crones, descubre los restos de un *Homo erectus*, que bautiza con las siglas KNM-ER-3733. Al mismo tiempo, una nueva datación de la toba KBS rebaja su antigüedad a 1,9 crones, pero el rejuvenecimiento del KNM-ER-1470 no altera el que éste se descubriera en los mismos depósitos que *Australopithecus*. (A. V.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

CRECIMIENTO DE LAS REGIONES CENTRALES DEL TERCER MUNDO

IMPROVED INTERNATIONAL COMPARISONS OF REAL PRODUCT AND ITS COMPOSITION: 1950-1980. Robert Summers y Alan Heston en *The Review of Income and Wealth*, Serie 30, n.º 2, págs. 207-262; junio, 1982.

URBANIZATION AND THIRD WORLD STABILITY. Henry Bienen en *World Development*, vol. 12, n.º 7, págs. 661-691; julio, 1984.

POPULATION REDISTRIBUTION TOWARDS LDC CORE AREAS, 1950-1980. Daniel R. Vining, Jr., en *International Regional Science Review*, vol. 10, n.º 1, en prensa.

LOS PUNTOS CALIENTES DE LA TIERRA

THE ICELAND MANTLE PLUME: STATUS OF THE HYPOTHESIS AFTER A DECADE OF NEW WORK. Peter R. Vogt en *Structure and Development of the Greenland-Scotland Ridge*, dirigido por Martin H. Bott y Svend Saxov. Plenum Publishing Corp., 1983.

HOTSPOT TRACKS AND THE EARLY RIFTING OF THE ATLANTIC. W. Jason Morgan en *Tectonophysics*, vol. 94, n.º 1-4, págs. 123-139; 1 de mayo de 1983.

A HOTSPOT MODEL FOR ICELAND AND THE VØRING PLATEAU. Gregory E. Vink en *Journal of Geophysical Research*, vol. 89, n.º B12, págs. 9949-9959; 10 de noviembre de 1984.

LA LIBERACION DE ACETILCOLINA

CONTINUOUS DETERMINATION BY A CHEMILUMINESCENT METHOD OF ACETYLCHOLINE RELEASE AND COMPARTMENTATION IN *TORPEDO* ELECTRIC ORGAN SYNAPTOSOMES. Maurice Israël y Bernard Lesbats en *Journal of Neurochemistry*, vol. 37, n.º 7, págs. 1475-1483; diciembre, 1981.

ACETYLCHOLINE MEASURED AT SHORT TIME INTERVALS DURING TRANSMISSION OF NERVE IMPULSES IN THE ELECTRIC ORGAN OF *TORPEDO*. Y. Dunant, G. J. Jones y F. Loctin en *The Journal of Physiology*, vol. 325, págs. 441-460; abril, 1982.

RECONSTITUTION OF A FUNCTIONAL SYNAPTOSOMAL MEMBRANE POSSESSING THE PROTEIN CONSTITUENTS INVOLVED IN ACETYLCHOLINE TRANSLOCATION. M. Israël, B. Lesbats, N. Morel, R. Manaranche, T. Gulik-Krzywicki y J. C. Dedieu en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 81, n.º 1, págs. 277-281; enero, 1984.

PARTICULAS Y FUERZAS ELEMENTALES

THE NATURE OF MATTER. Dirigido por J. H. Mulvey. Oxford University Press, 1981.

DESCUBRIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS SUBATÓMICAS. Steven Weinberg. Prensa Científica, S.A.; en prensa.

GAUGE THEORIES OF THE STRONG, WEAK, AND ELECTROMAGNETIC INTERACTIONS. C. Quigg. Benjamin-Cummings Publishing Co., 1983.

SUPERCOLLIDER PHYSICS. E. Eichten, I. Hinchliffe, K. Lane y C. Quigg en *Reviews of Modern Physics*, vol. 56, n.º 4, págs. 579-707; octubre, 1984.

COMPARTIMENTALIZACION DE LA PODREDUMBRE EN LOS ARBOLES

TREE DECAY: AND EXPANDED CONCEPT. Alex L. Shigo. Boletín de Información Agrícola, n.º 419, Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Oficina de Publicaciones, 1979.

AN EXPANDED CONCEPT OF TREE DECAY. W. Merrill y A. L. Shigo en *Phytopathology*, vol. 69, n.º 10, págs. 1158-1160; octubre, 1979.

MECHANISMS OF COMPARTMENTALIZATION OF DECAY IN LIVING TREES. Walter C. Shortle en *Phytopathology*, vol. 69, n.º 10, págs. 1147-1151; octubre, 1979.

EL TEMPLO DEL FORO ROMANO DE AMPURIAS

ETRUSCAN AND ROMAN ARCHITECTURE. A. Boethius y J. Ward-Perkins en *The Pelican History of Art*; 1970.

AUREA TEMPLA. P. Gros. Biblioteca de la Escuela Francesa de Arqueología en Roma; 1976.

LA RHÉTORIQUE DES ORDES DANS L'ARCHITECTURE CLASIQUE. P. Gros en *Caesarodonum, XIX bis*; París, 1979.

TASTE, TRADITION AND TECHNOLOGY: SOME ASPECTS OF THE LATE REPUBLICAN AND EARLY IMPERIAL CENTRAL ITALY. J. Ward-Perkins en *Studies in Classical Art and Archaeology*; Nueva York, 1979.

EL FÒRUM ROMÀ D'EMPÚRIES. J. Aquilvé, R. Mar, J. M. Nolla, J. Ruiz de Arbulo y E. Sanmartí. Diputació de Barcelona; 1984.

ANESTESIOLOGIA

LOS RECEPTORES DE LOS OPIÁCEOS Y SUBSTANCIAS OPIÁCEAS ENDÓGENAS. Solomon H. Snyder en *Investigación y Ciencia*, n.º 8, págs. 26-40; mayo, 1977.

HISTORY AND PRINCIPLES OF ANESTHESIOLOGY. Theodore C. Smith, Lee H. Cooperman y Harry Wollman en *The Pharmacological Basic of Therapeutics*, 6.ª edición, dirigido por Alfred Goodman Gilman, Louis S. Goodman y Alfred Gilman. Macmillan Publishing Co., Inc., 1980.

PROBING THE LIMITS OF HUMAN DEEP DIVING. P. B. Bennett y Melissa McLeod en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, vol. 304, págs. 105-117; 1984.

LA TURBINA DE VAPOR DE PARSONS

CHARLES PARSONS. Rollo Appleyard. Constable & Co., Ltd., 1933.

STEAM TURBINE THEORY AND PRACTICE. William J. Kearton. Pitman Publishing Co., 1958.

THE PARSONS CENTENARY—A HUNDRED YEARS OF STEAM TURBINES. F. R. Harris en *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A*, vol. 198, n.º 9, págs. 183-224; 1984.

JUEGOS DE ORDENADOR

THE ART OF COMPUTER PROGRAMMING, VOL. 2: SEMINUMERICAL ALGORITHMS. Addison-Wesley Publishing, 1969.

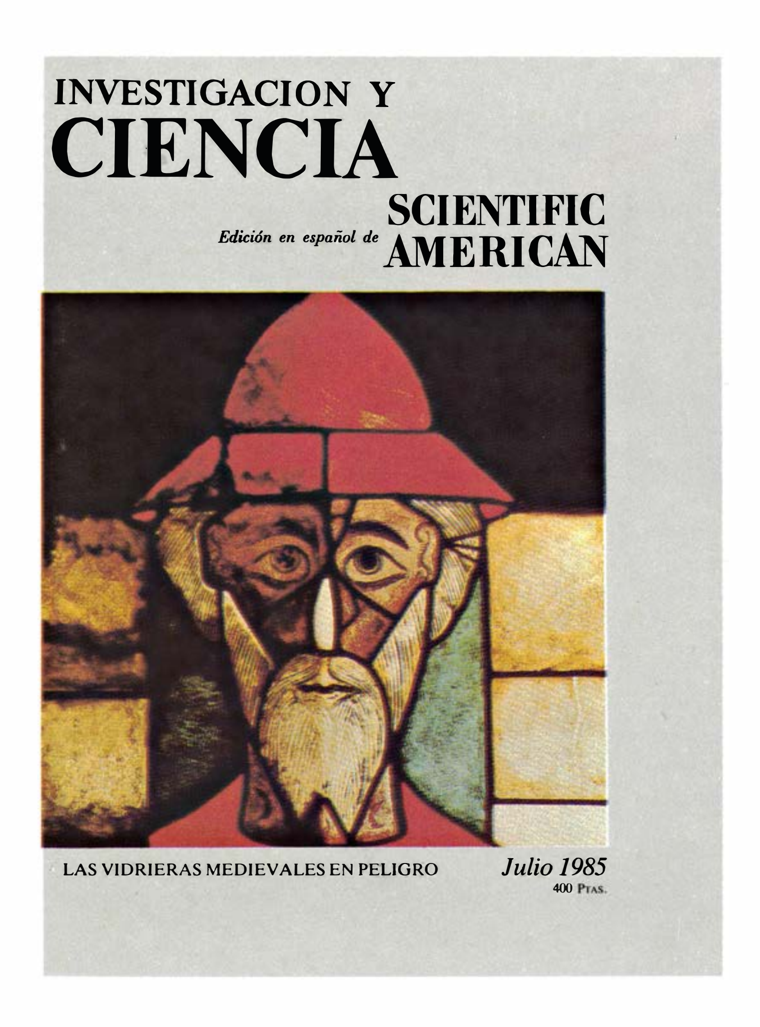
SYSTEM SIMULATION WITH DIGITAL COMPUTER. Narsingh Deo. Prentice-Hall, Inc., 1983.

TALLER Y LABORATORIO

THE STIRLING ENGINE. Graham Walker en *Scientific American*, vol. 229, n.º 2, págs. 80-87; agosto, 1973.

LIQUID PISTON STIRLING ENGINES. Colin D. West. Van Nostrand Reinhold Company, 1983.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ENFOQUES MOLECULARES DE LAS VACUNAS DE LA MALARIA, por G. Nigel Godson
El estudio de los genes que codifican las moléculas de la cubierta externa del parásito de la malaria pone de manifiesto una clase de proteínas que establecen sitios antigénicos repetidos.

COMO EXPLOTA UNA SUPERNOVA, por Hans A. Bethe y Gerald Brown
Cuando una gran estrella agota su combustible nuclear, su porción central se contrae en milisegundos. El subsiguiente "rebote" genera una onda de choque tan intensa que arrastra la mayor parte de la materia de la estrella.

QUESOS, por Frank V. Kosikowski
Sus más de 2000 variedades se obtienen de leche de mamífero, siguiendo un proceso que contempla nueve pasos. Las medidas que se tomen en éstos determinarán la variedad elaborada.

LA MUDA DEL CANGREJO AZUL, por James N. Cameron
Periódicamente pierde su caparazón y desarrolla otro nuevo. Empiezan a comprenderse los procesos químicos que subyacen a la formación del nuevo caparazón.

CRISTALES A ALTA PRESION, por Robert M. Hazen y Larry W. Finger
Los estudios por rayos X de cristales comprimidos entre dos diamantes revelan una gama de respuestas al aumento de presión.

PERCEPCION DE UN ENTORNO ESTABLE, por Hans Wallach
Percibimos nuestro entorno como algo estable a pesar del movimiento relativo que le confiere nuestro propio movimiento.

RESTAURACION DE VIDRIERAS MEDIEVALES, por Gottfried Frenzel
Víctima de su propia naturaleza y de la moderna contaminación atmosférica, el más brillante arte europeo está amenazado de destrucción.

PALEOPATOLOGIA DE LA COLUMNA VERTEBRAL, por Domingo Campillo
El hueso es la parte del organismo que mejor resiste el paso del tiempo después de la muerte. La paleopatología de la columna vertebral refleja dos tipos de afecciones, uno común a todo el esqueleto y otro que está en relación directa con la adquisición de la bipedia, que es exclusiva del ser humano.

